



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Civil
2009

**Filipe Urbano de
Abreu Carpinteiro**

Transposição Artificial de Areias na Barra de Aveiro



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Civil
2009

**Filipe Urbano de
Abreu Carpinteiro**

Transposição Artificial de Areias na Barra de Aveiro

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Doutor Carlos Daniel Borges Coelho, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho aos meus pais, irmão, namorada e em especial ao meu avô Urbano.

o júri

presidente

Prof. Doutor Aníbal Guimarães Costa
Professor catedrático da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Carlos Daniel Borges Coelho
Professor auxiliar da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor António Alexandre Trigo Teixeira
Professor auxiliar do Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa

agradecimentos

Agradeço ao Professor Doutor Carlos Coelho pelo seu apoio, paciência, disponibilidade e orientação na realização deste trabalho.

Ao Professor Doutor Fernando Veloso Gomes pela informação fornecida ajudando assim na elaboração deste trabalho.

A todos os familiares e amigos que contribuíram diariamente com todo o apoio, compreensão e força, em especial, aos pais, irmão e namorada.

palavras-chave

Alimentação Artificial de Areias, Transposição Artificial, Erosão Costeira, Transporte Sólido Litoral, Barra de Aveiro.

resumo

A zona costeira encontra-se em constante alteração. Devido às acções hidrodinâmicas e à construção de obstáculos (quebramares e esporões) ao longo da costa, o transporte sólido é alterado, traduzindo-se geralmente em balanços sedimentares negativos e na erosão da costa Portuguesa.

Esta constante instabilidade das zonas costeiras pode colocar em risco a preservação do ambiente natural, edifícios e estruturas costeiras, podendo no limite resultar em perdas de vidas humanas. Torna-se por isso vital combater este problema da erosão costeira e restabelecer o equilíbrio sedimentar na costa Portuguesa. Para minorar este problema pode-se recorrer a sistemas de transposição artificial de areias, tentando restabelecer o natural transporte de sedimentos e repondo a sotamar de obstáculos os sedimentos necessários para o equilíbrio da costa.

A presente dissertação tem a finalidade de estudar o efeito dos diversos sistemas de transposição artificial de areias existentes e a sua aplicação ao caso da Barra de Aveiro. A transposição artificial de areias entendida como uma reposição do natural transporte sedimentar de forma contínua, nunca foi aplicada em Portugal. Para tal, efectuou-se o levantamento do tipo de equipamentos e tecnologias existentes. Efectuou-se também um levantamento de inúmeros casos já implementados a nível mundial. Também são apresentados alguns casos portugueses de alimentações artificiais realizados pontualmente.

Para avaliação da melhor forma de colocação das areias na operação de alimentação ou transposição recorreu-se ao programa de modelação LTC, que simula a evolução da linha de costa, permitindo uma análise de cada um dos sistemas adoptados neste estudo. Para isso, foi necessário conhecer algumas características da zona, tais como a agitação marítima (as alturas e períodos de onda), as características sedimentares, os volumes de transporte sólido, a batimetria, a topografia e as intervenções de defesa costeira já realizadas no local.

Com base em todos esses elementos foi feita uma análise de cenários e respectivos resultados obtidos no programa, com o objectivo de propor qual o tipo de sistema e a forma mais adequada de proceder no caso da Barra de Aveiro.

keywords

Artificial Sand Nourishment, Sand Bypassing, Coastal Erosion, Littoral Drift, Aveiro Inlet.

abstract

The coastal area is in permanent changing. Solid transport volumes are changed due to the hydrodynamics actions and the construction of barriers (breakwaters and groins) along the coast, which leads to the erosion of the Portuguese coast. The preservation of the natural environment, buildings, coastal structures and even human's life may be in danger by the constant instability of coastal areas. Therefore, it is extremely important to minimize the coastal erosion problem and restore the sediment balance of the Portuguese coastline. Artificial sand bypassing systems are normally used to decrease this problem, since these systems can restore the balance of the coastline by similar conditions of natural sediment transport.

This dissertation aims to study the effect of the several artificial sand bypassing systems when applied to the Aveiro inlet. None of these systems has ever been used in Portugal. Thus, a research of several cases applied worldwide was made. Some Portuguese cases of artificial nourishment are also presented.

LTC numerical model was used to assess several artificial sand bypassing solutions. This model simulates the shoreline evolution for each system used in this case study. In doing so, it is necessary to know some characteristics of the area, such as wave climate (wave height and periods), sediment grain size, sediment transport volumes, bathymetry and topography.

At last, an analysis of the results of the program is presented, in order to suggest the most appropriated type of system to the Aveiro inlet.

ÍNDICE:

1	INTRODUÇÃO	1
2	TECNOLOGIA EXISTENTE	3
2.1	Tipos de Sistemas	3
2.1.1	Sistemas Fixos	3
2.1.2	Sistemas Semi-Móveis	5
2.1.3	Sistemas Móveis	6
2.2	Equipamentos	7
2.2.1	Extracção	7
2.2.2	Transporte e deposição dos sedimentos	9
2.3	Caracterização de limites de transporte de cada sistema	11
3	EXEMPLOS DE SISTEMAS DE TRANSPOSIÇÃO	13
3.1	A nível Mundial	13
3.1.1	Rio Nerang, Austrália	13
3.1.2	Rio Tweed, Austrália	14
3.1.3	Rio Indian, EUA	15
3.1.4	Embocadura do South Lake Worth, EUA	15
3.1.5	Embocadura de Masonboro, EUA	16
3.1.6	Porto de Oceanside, EUA	16
3.1.7	Embocadura de Boca Raton, EUA	17
3.1.8	Comparação dos sistemas	17

3.2	Alimentação artificial de areias em Portugal	19
3.2.2	Costa da Caparica	19
3.2.2	Vale do Lobo	21
3.2.3	Ilha da Madeira	22
4	DESCRIÇÃO DA BARRA DE AVEIRO	25
4.1	Caracterização sedimentar	26
4.2	Agitação marítima	27
4.2.1	Rumos dominantes	28
4.2.2	Alturas e períodos de onda	29
4.3	Volumes de transporte sólido	31
4.4	Batimetria, topografia e intervenções de defesa costeira	33
4.5	Sistemas mais adequados à Barra de Aveiro	37
5	MODELAÇÃO DA EVOLUÇÃO DA LINHA DE COSTA	39
5.1	Modelo LTC	39
5.2	Definição das condições de modelação	40
5.3	Testes efectuados	44
5.3.1	Alimentações contínuas	44
5.3.2	Alimentações localizadas	46
6	ANÁLISE DOS RESULTADOS	53
6.1	Alimentações contínuas	53
6.2	Alimentações localizadas	60

6.3	Análise da melhor opção	71
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	77
7.1	Conclusões	77
7.2	Desenvolvimentos futuros	79
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81

ÍNDICE DE FIGURAS:

Figura 1 -	Sistema fixo de transposição artificial de areia instalado num quebramar (adaptado de Bodge, 2003)	4
Figura 2 -	Esquema de um sistema semi-móvel de transposição artificial de areias (adaptado de Bodge, 2003)	5
Figura 3 -	Esquema de um sistema móvel de transposição artificial de areia (adaptado de Bodge, 2003)	7
Figura 4 -	Draga mecânica (Paixão, 2008)	8
Figura 5 -	Draga hidráulica (Van Oord, 2008)	8
Figura 6 -	Descarga por tubagem hidráulica (Brevard Country, 2009)	9
Figura 7 -	Descarga de sedimentos através da abertura dos porões (adaptado de CEM, 2003)	10
Figura 8 -	Sistema de descarga em arco-íris (Van Oord, 2008)	11
Figura 9 -	Sistema de descarga aplicado no Rio Nerang, Austrália (Google Earth, 2009)	14
Figura 10 -	Sistema de descarga aplicado no Rio Tweed, Austrália (Google Earth, 2009)	15
Figura 11 -	Operação de repulsão de areias para a praia na Costa da Caparica (Veloso-Gomes <i>et. al.</i> , 2007)	21
Figura 12 -	Barra de Aveiro e respectiva área envolvente (Google Earth, 2008)	25
Figura 13 -	Representação das classes de direcção de onda com os dados do Instituto Hidrográfico para a bóia de Leixões, entre 1993 e 2003 (Coelho, 2005)	29
Figura 14 -	Frequência de ocorrência do período médio de onda na bóia de Leixões de 1981 a 2003 (Coelho, 2005)	31

Figura 15 -	Topografia da zona costeira da Barra de Aveiro (Google Earth, 2009)	33
Figura 16 -	Batimetria da zona de Aveiro (Veloso-Gomes, 2006c)	34
Figura 17 -	Representação dos dados topográficos e batimétricos referentes à zona de estudo (Coelho, 2005)	35
Figura 18 -	Esquematisação das obras de defesa costeira da região de Aveiro	36
Figura 19 -	Esquema do clima de agitação adoptado nos testes do LTC	42
Figura 20 -	Área de modelação no LTC	43
Figura 21 -	Esquema demonstrativo da zona de extracção e de deposição do Perfil 330 (Google Earth, 2009)	45
Figura 22 -	Esquema demonstrativo da zona de extracção e de deposição do Perfil 315 (Google Earth, 2009)	45
Figura 23 -	Teste 1: Alimentação na área 300x500 m ² , ao longo da praia	47
Figura 24 -	Teste 2: Alimentação na área 300x500 m ² , transversal à praia	48
Figura 25 -	Teste 3: Alimentação na área 100x1500 m ² , ao longo da praia	48
Figura 26 -	Teste 4: Alimentação na área 300x500 m ² , ao longo da praia e a meio do perfil activo	49
Figura 27 -	Teste 5: Alimentação na área 600x1000 m ² , ao longo da praia	49
Figura 28 -	Teste 6: Alimentação na área 300x500 m ² , ao longo da praia através de 8 intervenções	50
Figura 29 -	Teste 7: Alimentação na área 300x500 m ² , ao longo da praia durante 6 meses	50
Figura 30 -	Teste 8: Alimentação na área 300x500 m ² , ao longo da praia no Perfil 315	51
Figura 31 -	Caudal sólido em transporte nos perfis de controlo	54

Figura 32 -	Esquema da relação entre a linha de costa e a direcção de propagação da onda no transporte sólido longitudinal	55
Figura 33 -	Comparação do balanço sedimentar em cada um dos perfis	56
Figura 34 -	Evolução da linha de costa para diferentes situações de alimentação contínua	57
Figura 35 -	Comparação das taxas de avanço ou recuo da linha de costa nos perfis de controlo	59
Figura 36 -	Comparação do transporte sólido nos diversos casos de alimentação	62
Figura 37 -	Comparação do balanço sedimentar nos diversos casos de alimentação	64
Figura 38 -	Evolução da linha de costa para as alimentações artificiais de areias	66
Figura 39 -	Comparação da evolução da linha de costa nas alimentações artificiais	70
Figura 40 -	Evolução da linha de costa para os dois tipos de alimentação	72
Figura 41 -	Taxa de erosão e acreção nos dois tipos de alimentação	74

ÍNDICE DE TABELAS:

Tabela 1 -	Resumo das características de diversos sistemas mundiais de transposição artificial de areias	18
Tabela 2 -	Comparação de ocorrências (%) de altura de onda significativa (Coelho, 2005)	30
Tabela 3 -	Parâmetros adoptados no cálculo da altura de onda	41
Tabela 4 -	Volumes de sedimentos transpostos na Barra ao fim de 50 anos, nas alimentações contínuas	46
Tabela 5 -	Descrição dos testes efectuados	60
Tabela 6 -	Volumes de sedimentos envolvidos nas alimentações localizadas ao fim de 50 anos	68
Tabela 7 -	Volumes de sedimentos ao fim de 50 anos nos dois tipos de alimentação	73

1 INTRODUÇÃO

A zona costeira pode ser considerada uma zona extremamente dinâmica, em que as transformações e alterações são permanentes, devido ao facto de se tratar de uma zona em que as fronteiras sólidas terrestres estão sujeitas a acções hidrodinâmicas marítimas. Pela diversidade de factores e parâmetros envolvidos, o estudo destas transformações é algo complexo.

Nestas zonas, a construção de quebramares, com a função de garantir boas condições de navegabilidade em portos ou embocaduras, origina a interrupção do natural transporte sedimentar ao longo da costa. O transporte sedimentar, que ocorre através de processos naturais, originado pela acção de ondas, correntes e marés, é alterado e a areia fica retida a barlamar da estrutura de quebramares. Com a retenção de sedimentos a barlamar da estrutura, as praias a sotamar começam a sofrer processos de erosão, originando um desequilíbrio no balanço de massas e, correspondente, recuo da linha de costa. Este problema pode resultar em consequências graves para a economia local, turismo e estruturas circundantes.

De modo a combater estes problemas desenvolveram-se processos que tentam restabelecer o equilíbrio natural de massas. A alimentação artificial de areias é um processo que se baseia na extracção de sedimentos de um local de empréstimo, transporte e posterior depósito na zona que apresenta défice. Existem inúmeras formas de executar a alimentação artificial de areias, sempre associada a sistemas que permitem uma certa mobilidade.

Associada à alimentação artificial de areias, destaca-se a transposição artificial de areias.

Considerando a transposição artificial de areias uma forma específica de alimentação artificial de areias, esta distingue-se pelo facto de através destes sistemas se garantir o movimento sedimentar normal, que existia anteriormente às construções costeiras. Ou seja, as areias colocadas a sotamar (onde estão em défice) são provenientes de barlamar, onde há uma acumulação por efeito do quebramar, ou do canal de navegação.

De salientar que para o planeamento de um projecto de transposição artificial em embocaduras seja eficiente, é necessário definir correctamente o problema, através de

inspecções e modelos de estimativa do transporte sedimentar. Desta forma, pode-se determinar se há a necessidade de melhoramentos ou alterações nos quebra-mares ou outras estruturas, ou nos canais de navegação. Nos estudos a efectuar devem-se definir as quantidades requisitadas de sedimentos e se há variações de comportamentos sazonais ou anuais significativas. É importante definir os apropriados métodos para o trabalho e os locais ideais de remoção e deposição dos sedimentos (Pinheiro, 2006).

Numa fase inicial do trabalho procedeu-se ao levantamento da tecnologia existente para a execução da transposição artificial de areias, apresentando alguns dos diferentes sistemas possíveis. Também se referem vários casos internacionais de aplicação de sistemas de transposição artificial de areias e casos de alimentação artificial de areias em Portugal, dando maior ênfase ao caso da Costa da Caparica e de Vale do Lobo.

Apresenta-se ainda, uma descrição da Barra de Aveiro, onde são referidas algumas características: sedimentares, de agitação marítima (alturas e períodos de onda), de volumes de transporte sólido, de batimetria, de topografia e das obras de defesa costeira desta zona. Por fim, conclui-se esta análise com a identificação dos sistemas mais adequados à Barra de Aveiro.

Posteriormente, é apresentado um capítulo onde são descritos todos os procedimentos e estudos efectuados na análise da evolução da linha de costa por efeito de diferentes soluções de alimentação e transposição artificial de areias, recorrendo ao auxílio de um programa de modelação numérica (LTC).

No capítulo seguinte, é feita uma análise dos resultados obtidos através da modelação efectuada, para cada um dos diferentes casos simulados, adoptando-se soluções com diferentes localizações, tempos de recarga, número de operações de acreção de sedimentos, volumes de deposição, tempo de cada operação de deposição e áreas da intervenção.

Por fim, e após análise de todos os elementos e resultados, são apresentadas as principais conclusões, a que se chegou com este estudo.

2 TECNOLOGIA EXISTENTE

Existem vários tipos de sistemas de transposição artificial de areias, podendo ser agrupados em três grupos distintos quanto à sua mobilidade: sistemas fixos, sistemas móveis e sistemas semi-móveis. Os sistemas fixos estão normalmente associados a uma utilização contínua de modo a maximizar o rendimento, enquanto os sistemas móveis ou semi-móveis estão normalmente associados a uma utilização periódica (Bodge, 2003).

A escolha destes sistemas é influenciada pela localização das áreas de acumulação de sedimentos, ou também denominadas por ‘armadilhas de sedimentos’ (*sand trap* na bibliografia anglo-saxónica), que está dependente das características da agitação e morfologia locais, dos caminhos de transporte sedimentar e da própria configuração das estruturas marítimas e da embocadura (Pinheiro, 2006).

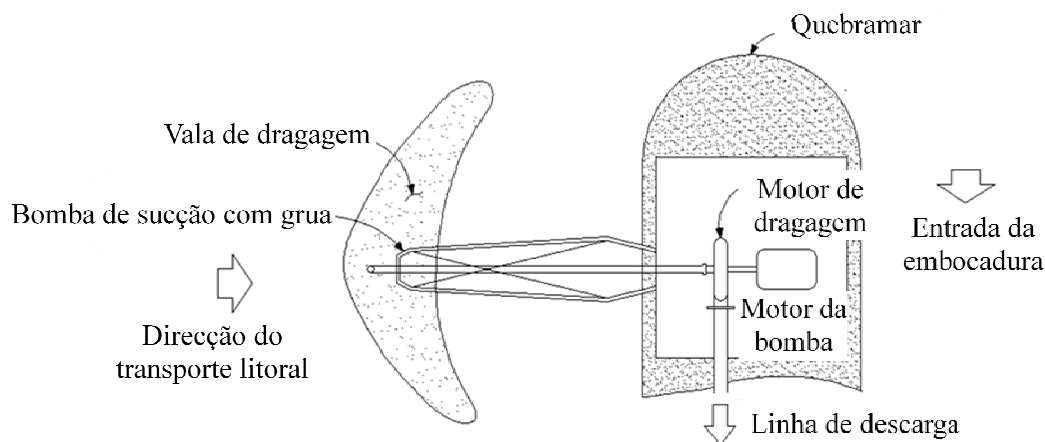
2.1 Tipos de Sistemas

Tal como já foi referido anteriormente, os sistemas de transposição artificial de areias podem-se agrupar em três tipos, que se diferenciam na mobilidade e períodos de funcionamento. Os sistemas estão classificados como sistemas fixos, sistemas móveis e sistemas semi-móveis.

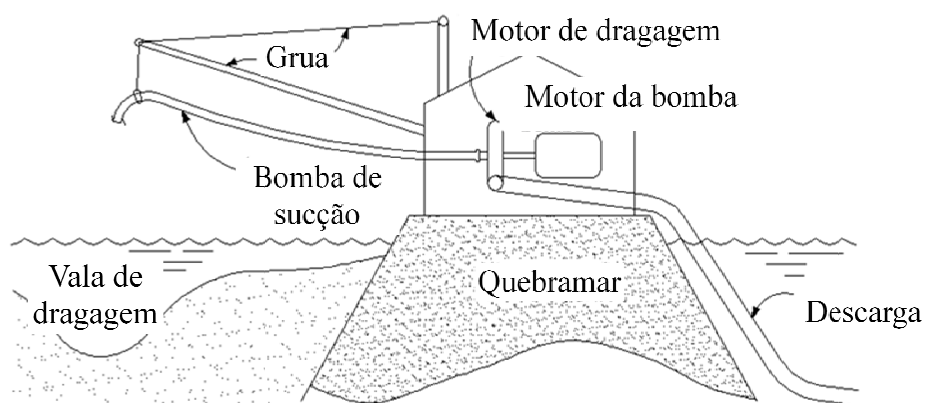
2.1.1 Sistemas Fixos

Distinguem-se dois métodos de transposição artificial de areias no grupo dos sistemas fixos.

Sendo os sistemas fixos considerados sistemas estacionários, o primeiro método de adução está normalmente associado a transferências contínuas de sedimentos através de equipamentos de sucção de areias, nomeadamente bombas de sucção (Figura 1). Estas bombas são colocadas ao longo do quebramar de barlar, operando sem qualquer mobilidade, podendo existir uma ou várias bombas operando em conjunto (CHL, 2008).



a) Esquema em planta



b) Esquema em corte

Figura 1 - Sistema fixo de transposição artificial de areia instalado num quebramar (adaptado de Bodge, 2003)

As bombas de sucção são constituídas por uma série de componentes, entre os quais: a bomba e o motor da bomba, uma estrutura de protecção da bomba em relação à agitação marítima, grua ou guincho que suporta as bombas de sucção, tubo de descarga e bombas de reforço ao longo da tubagem de transporte, no caso de serem necessárias (Richardson, 1990).

Para além das bombas de sucção existem outras que pertencem ao grupo de bombas mais usuais, tais como, bombas de jacto, bombas submersíveis e fluidificadores que servem para obter uma maior capacidade de aspiração (Richardson, 1990).

O outro método de alimentação e transposição artificial de areias envolve dragagens ou escavação de areias. Também associado a transferências contínuas de sedimentos, este método traduz-se no uso de dragas e maquinaria pesada que operam instalados de forma permanente numa determinada localização, como por exemplo nos quebramares. Este género de alimentação e transposição artificial de areias necessita de um conjunto de maquinaria para além das dragas. No caso do transporte ser feito por terra, são necessários camiões para o transporte das areias e no caso desse transporte ser feito por mar, embarcações próprias para o transporte de areias (CHL, 2008).

2.1.2 Sistemas Semi-Móveis

Os sistemas semi-móveis envolvem normalmente o uso de bombas, que são colocadas num local da embocadura durante um determinado período de tempo e depois movimentadas para outro local (Figura 2). O transporte da areia extraída pode ser feito por barcos, camiões ou tubagens.

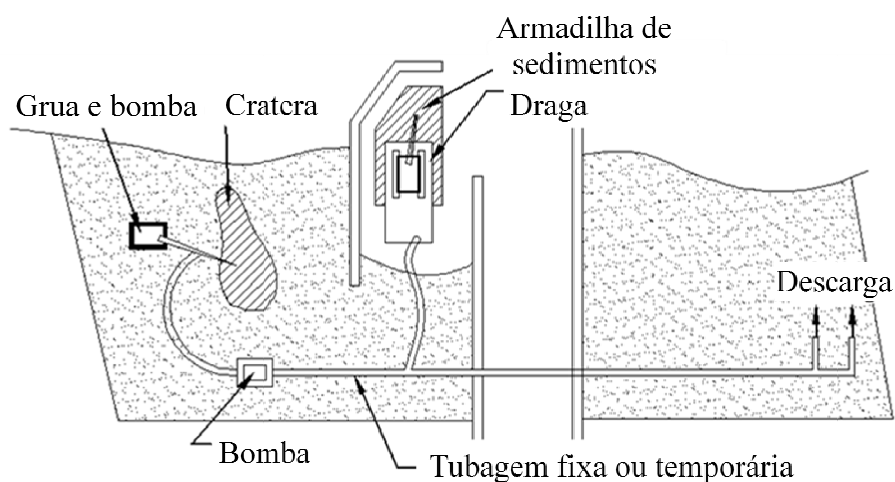


Figura 2 - Esquema de um sistema semi-móvel de transposição artificial de areias (adaptado de Bodge, 2003)

Os componentes que constituem estes tipos de sistemas são: equipamentos de dragagem, tubagens permanentes ou temporárias, podendo existir ainda outros tipos de equipamentos para descarga de areias.

Relativamente à escolha deste tipo de sistemas, para o processo de transferência de sedimentos podem ser adoptados vários períodos de tempo. Estes sistemas são usados tanto em transferências de sedimentos periódicas como em transferências de sedimentos contínuas (Bodge, 2003)

2.1.3 Sistemas Móveis

Os sistemas móveis englobam dispositivos de dragagem flutuante ou sistemas colocados na zona costeira e montados em veículos.

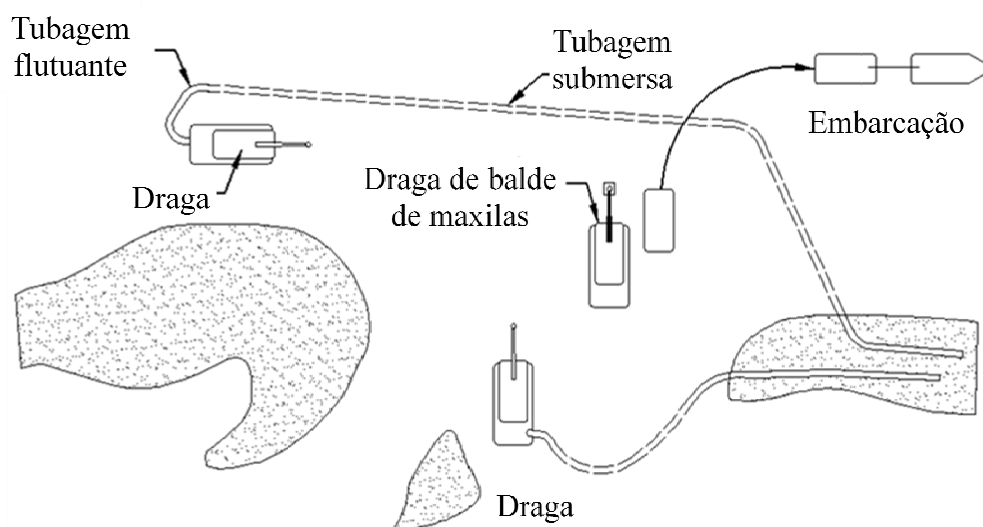


Figura 3 - Esquema de um sistema móvel de transposição artificial de areia (adaptado de Bodge, 2003)

O uso de dispositivos flutuantes permite, normalmente, a transferência de grandes quantidades de sedimentos e uma grande mobilidade. No entanto, este tipo de equipamentos necessitam que a área a ser dragada esteja razoavelmente protegida das ondas e permita um fácil acesso, em termos de distância da linha de costa (Figura 3).

As soluções implementadas na costa transferem quantidades menores de sedimentos, requerem um acesso através da praia e têm menos exigências em relação à protecção marítima.

A opção por este tipo de sistemas móveis e semi-móveis pode ser considerada tanto para um processo de transferência de sedimentos periódico como contínuo (Richardson e McNair, 1981).

Em relação ao equipamento de dragagem, este pode ser comprado ou alugado por determinado período de tempo, sendo mais aconselhada a opção de compra quando a frequência de transposição de sedimento é alta (Richardson e McNair, 1981).

2.2 Equipamentos

Para aplicar os diferentes sistemas de transposição artificial de areias são necessários vários equipamentos, entre os quais, equipamento para extracção de sedimentos, transporte e deposição.

2.2.1 Extracção

Entre os vários tipos de equipamento para extracção de sedimentos, podem-se distinguir dois: as dragas mecânicas e as dragas hidráulicas.

Como exemplos de dragas mecânicas podem-se referir as dragas de uma pá ou balde de maxilas (escavadora). Podem operar a partir de terra, junto à linha de costa, ou a partir do mar, montadas em equipamentos flutuantes, como demonstra a Figura 4. Este equipamento aplica-se tanto a sistemas fixos como móveis, podendo ser contínuos ou periódicos, e destina-se a situações em que o solo é mais duro (Bodge, 2003).



Figura 4 - Draga mecânica (Paixão, 2008)

As dragas hidráulicas são constituídas por bombas convencionais de sucção, bombas jacto ou bombas submersíveis (Figura 5). Existe uma grande variedade e podem incorporar os diversos tipos de sistemas de transposição. As dragas instaladas em barcas, movem-se continuamente enquanto aspiram os sedimentos do fundo marinho, operando ao longo do canal ou da área de dragagem. As bombas jacto são bombas hidráulicas sem partes móveis, e são mais adequadas a situações onde existe necessidade de transposição de sedimentos contínua ou com grande frequência. Estas podem ser incorporadas tanto em sistemas fixos como móveis, sendo a sua maior limitação a obstrução das bombas pelos detritos sólidos (Bodge, 2003).

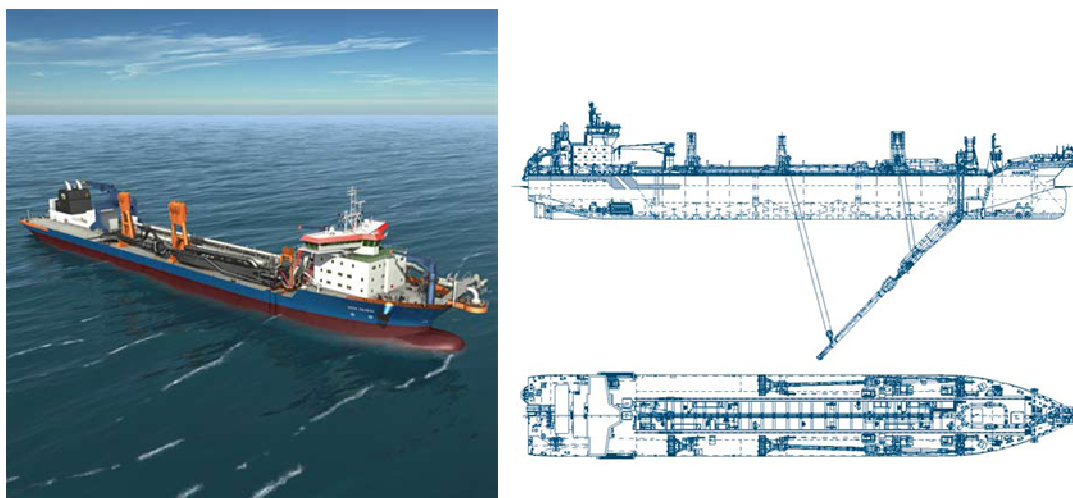


Figura 5 - Draga hidráulica (Van Oord, 2008)

2.2.2 Transporte e deposição dos sedimentos

O equipamento disponível para as operações de transporte e descarga dos sedimentos extraídos é muito vasto.

O recurso a soluções de repulsão para terra usando um sistema de tubagens flutuantes, imersas ou uma combinação de ambas, são as mais usuais (Figura 6). Esta solução é normalmente usada em sistemas fixos de transposição artificial de areias, em que os sedimentos após extraídos são transportados através de tubagens, da zona de extracção até à zona de descarga. Consoante esta distância, recorre-se ao auxílio de bombas de reforço de forma a transportar os sedimentos por toda a tubagem (Bodge, 2003).

Como exemplos de aplicação desta solução destacam-se os casos Australianos dos rios “Nerang” e “Tweed”, abordados mais detalhadamente no Capítulo 3.



a) Zona de extracção e deposição



b) Deposição e espalhamento

Figura 6 - Descarga por tubagem hidráulica (Brevard Country, 2009)

No entanto, em sistemas móveis os sedimentos extraídos podem ser armazenados em barcaças, fluidificados com água limpa e posteriormente depositados nas praias através de um sistema de tubagens (Veloso-Gomes, 2001).

Outra forma de descarga dos sedimentos extraídos é através da abertura dos porões da barcaça de transporte (Figura 7), que faz a descarga directa dos sedimentos, em zonas submersas, desde que haja profundidade suficiente para a barcaça se movimentar. Esta técnica de deposição dos sedimentos apresenta menores custos mas também é menos eficaz, pois depende do regime de agitação (Veloso-Gomes, 2001).

Como alternativa às anteriores soluções, apresentam-se as soluções mistas de descargas em zonas submersas e bombagem para troços da praia. Esta solução consiste em colocar os sedimentos em troços submersos próximos da zona a reperfilar recorrendo a uma draga não estacionária, e repulsar os sedimentos para a praia com o auxílio de uma draga estacionária (Veloso-Gomes, 2001).

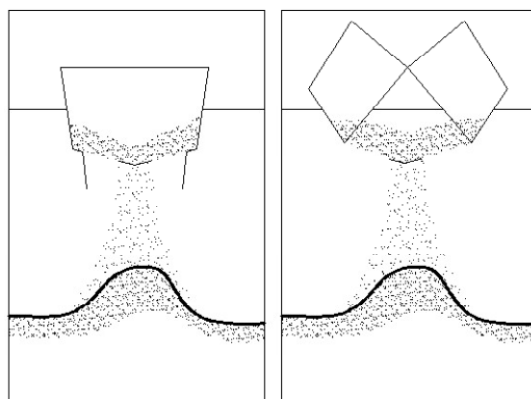


Figura 7 - Descarga de sedimentos através da abertura dos porões (adaptado de CEM, 2003)

Outros sistemas de descarga muito usados em operações de alimentação artificial de areias são os sistemas de descarga em arco-íris (Figura 8). São sistemas hidráulicos que consistem numa descarga em forma de jacto, em que o sedimento é projectado através de um tubo montado numa barcaça. A mistura de areias e água é assim depositada nas praias em forma

de arco. Este tipo de embarcação permite um alcance de projecção dos sedimentos na ordem dos 100 metros (Bodge, 2003).



Figura 8 - Sistema de descarga em arco-íris (Van Oord, 2008)

A descarga recorrendo a meios terrestres também é uma solução, em que o material, extraído de forma hidráulica ou mecânica, é transportado por camião. Esta solução tem algumas limitações, nomeadamente necessita de acessos adequados que permitam a deslocação do camião e é viável apenas para pequenos volumes de alimentação, pelos custos elevados implicados neste tipo de operação (Pinheiro, 2006).

2.3 Caracterização de limites de funcionamento de cada sistema

A escolha de um dos sistemas de transposição artificial de areias para aplicação a um determinado caso é uma decisão muito importante.

Os sistemas de transposição artificial de areias diferenciam-se entre si, não só no tipo de sistema, mas também na capacidade de transposição de sedimentos que possuem. É por isso vital determinar a quantidade de sedimentos que se pretende transpor e analisar se existem fontes de sedimentos disponíveis para o volume pretendido. As condições marítimas, nomeadamente marés, ondas e tempestades também influenciam a escolha do

sistema, pois alteram a quantidade e frequência de sedimentos que chega à zona de recolha (Loza, 2008).

Assim sendo, a escolha de um sistema consoante o tempo de operacionalidade e a mobilidade é muito importante para a eficiência da própria solução.

De acordo com Boswood e Murray (2001) os maiores volumes transpostos foram registados num sistema fixo e contínuo, na Austrália. Este sistema, localizado na entrada do rio Nerang e a operar desde 1986, movimenta entre 500000 m³/ano e 750000 m³/ano de areias. Contudo, há registo de sistemas móveis que também têm a capacidade para grandes volumes de transporte sólido, na ordem dos 200000 m³/ano (Clausner, 1999).

3 EXEMPLOS DE SISTEMAS DE TRANSPOSIÇÃO

No presente capítulo, são apresentados alguns dos sistemas de transposição artificial de areias existentes. A descrição destas soluções é feita a nível mundial, já que tais sistemas não foram ainda aplicados em Portugal. No entanto, são apresentados alguns casos Portugueses de alimentações artificiais de areias.

3.1 A nível Mundial

Neste capítulo serão descritos, alguns dos casos internacionais, que recorreram aos sistemas de transposição artificial de areias, descritos no capítulo anterior. A exposição destes casos de estudo mundiais evidencia as características hidrodinâmicas em cada aplicação e faz uma descrição do sistema utilizado, referindo alguma da tecnologia empregue. Também é feita uma referência ao transporte litoral anual e aos problemas existentes no uso de determinada tecnologia, com objectivo de uma posterior comparação para a obtenção das melhores soluções para cada situação.

3.1.1 Rio Nerang, Austrália

Localizado na costa Este Australiana, a entrada no rio Nerang possui um sistema contínuo e fixo de transposição artificial de areias (Figura 9). Este sistema, implementado em 1986, é constituído por dez bombas de jacto, instaladas ao longo de uma ponte-cais com cerca de 490 metros. O sistema é controlado por um computador que acciona automaticamente a bombagem quando a acumulação de areias atinge um determinado limite, o que permite também uma poupança de energia. De salientar que o transporte litoral anual nesta zona é de cerca de 580000 m³/ano, dominante no sentido Sul-Norte. Trata-se de um sistema bem sucedido mas que apresenta alguns aspectos negativos, tais como, danos nas bombas e nas tubagens causados pela erosão devida à circulação dos sedimentos extraídos (Pinheiro, 2006).



Figura 9- Sistema aplicado no Rio Nerang, Austrália (Google Earth, 2009)

3.1.2 Rio Tweed, Austrália

Situado também na costa Este Australiana (Figura 10), encontra-se outro sistema contínuo e fixo de transposição artificial de areias. Este sistema implementado em 2001, semelhante ao sistema adoptado no rio Nerang, é constituído por onze bombas de jacto instaladas ao longo de uma ponte-cais com 450 metros e possui cinco pontos de descarga, ou seja, este sistema alimenta cinco locais diferentes através de um sistema de tubagens. Para além deste sistema fixo, necessita de dragagens suplementares periódicas, recorrendo ao uso de uma draga móvel. Esta situação acontece devido ao efeito barreira causado pelo facto do quebramar ser reduzido, impedindo assim uma grande acumulação de sedimentos ao longo do mesmo. Esta solução acaba por se traduzir num funcionamento ineficaz do sistema de bombagem, que necessita de recorrer a dragagens suplementares para alimentar a praia que sofre de défice sedimentar. O transporte litoral anual é de $500000 \text{ m}^3/\text{ano}$, dominante no sentido Sul-Norte (Pinheiro, 2006 e Loza, 2008).



Figura 10 - Sistema aplicado no Rio Tweed, Austrália (adoptado do Google Earth, 2009)

3.1.3 Rio Indian, EUA

Implementado em 1990, no estado de Delaware, nos Estados Unidos, este sistema de transposição de areias trata-se de um sistema contínuo e semi-móvel, constituído por uma grua móvel instalada na praia, que suporta uma bomba de jacto. Esta solução actua num raio de 120 metros a sul do quebramar. O transporte litoral anual nesta região é de 84000 m³/ano sendo dominante no sentido Sul-Norte (Pinheiro, 2006).

Apesar deste caso representar um sistema contínuo, a operação de transposição de areias é interrompida durante o Verão, três meses por ano, porque se trata de uma zona turística frequentada por inúmeros banhistas (Loza, 2008).

3.1.4 Embocadura do South Lake Worth, EUA

Para melhorar as condições do canal de navegação e reduzir a erosão das praias, foi implementado em 1937, um sistema fixo e contínuo na embocadura do South Lake Worth, na costa Este dos Estados Unidos. Este sistema é composto por um braço mecânico, que suporta uma bomba de sucção e o tubo de aspiração, e o tubo de descarga. Montado no quebramar Norte, este sistema permite um raio de acção de nove metros. O transporte

sedimentar litoral anual é dominante no sentido Norte-Sul e estima-se em 135000 m³/ano (Pinheiro, 2006 e Loza, 2008).

3.1.5 Embocadura de Masonboro, EUA

Situada na costa Este dos Estados Unidos da América, mais detalhadamente no estado da Carolina do Norte, a embocadura de Masonboro possui um caso particular de transposição artificial de areias que também pode ser classificado como um caso de alimentação artificial de areias. Implementado em 1959, este sistema em que se executam dragagens de quatro em quatro anos, pode-se classificar como sendo um sistema periódico e móvel. Para além das dragas, este sistema possui um descarregador e uma armadilha de sedimentos. Neste caso, em que o transporte sedimentar litoral é em média de 220000 m³/ano e as dragagens são de quatro em quatro anos, o sedimento extravasa a área da bacia de deposição. O volume médio de dragados efectuados em cada uma destas operações é de cerca de 920000 m³ de areias (Pinheiro, 2006).

3.1.6 Porto de Oceanside, EUA

A cerca de 130 km da cidade de Los Angeles, o porto de Oceanside é outro exemplo de um sistema semi-móvel de bombas de sucção com desagregação por jacto de água, mais conhecidos por “eductors”.

Este porto, construído em 1943, teve um efeito imediato na erosão costeira da praia a sul. Com o agravar do problema, em 1989 foi implementado um sistema de transposição artificial de areias, composto por duas bombas de jacto fixas na entrada do porto e mais uma bomba apoiada numa grua móvel implantada no quebramar de barlamar. O transporte sedimentar litoral é de 920000 m³/ano, em que as duas bombas fixas transferem 152000 m³/ano e a bomba instalada no quebramar transfere 114000 m³/ano. Este sistema tem apresentado alguns problemas relacionados com a manutenção, devido à acumulação de detritos na zona de sucção das bombas (JAPA, 1995 e Hales, 1995).

3.1.7 Embocadura de Boca Raton, EUA

Situada 65 km a Norte de Miami, na Florida, a ligação do Lago Boca Raton ao Atlântico possui um sistema de transposição de areias composto por uma parte fixa e outra móvel, em que o transporte sedimentar litoral é de $124000 \text{ m}^3/\text{ano}$. O sistema possui ainda um descarregador com vinte metros de comprimento, localizado no quebramar Norte. A parte fixa e contínua é constituída por uma draga estacionária de sucção e repulsão, que garante um volume de dragados de $70000 \text{ m}^3/\text{ano}$, a partir de uma armadilha de sedimentos. A parte móvel e periódica é constituída também por uma draga e garante um volume de dragados de dez em dez anos de 176000 m^3 no banco de areia exterior. De salientar ainda que este sistema tem efectuado simultaneamente alimentação artificial de algumas praias a Sul (JAPA, 1995).

3.1.8 Comparação dos sistemas

Para uma melhor análise comparativa dos diferentes sistemas de transposição artificial de areias, a nível mundial, elaborou-se a Tabela 1. Nesta tabela estão dispostas e resumidas algumas características de cada um dos casos de estudo, nomeadamente o tipo de sistema, características técnicas, o volume de transporte litoral e o volume de transporte sólido que o sistema consegue transpor.

O primeiro aspecto que se retira da análise desta tabela, é que os tipos de sistemas de transposição artificial de areias usados para os casos com maior transporte sólido litoral são os sistemas fixos e contínuos. Os menores volumes de transposição correspondem a sistemas móveis e semi-móveis, periódicos.

Contudo, todos os casos de estudo mundiais apresentados neste trabalho possuem volumes de transporte sólido litoral inferiores aos referidos para o caso da costa Portuguesa (cerca de 1,5 milhão de metros cúbicos por anos, como está mencionado mais a frente, no Capítulo 4).

Tabela 1 – Resumo das características de diversos sistemas mundiais de transposição artificial de areias

<i>Caso de estudo</i>	Tipo de sistema	Características técnicas	Transporte litoral anual (m ³ /ano)	Volume de transporte sólido (máx.)
Rio Nerang, Austrália (1986)	Fixo e contínuo	10 Bombas de jacto	580000	570 m ³ /h
Rio Tweed, Austrália (2001)	Fixo e contínuo	11 Bombas de jacto e 4 pontos de descarga	500000	500 m ³ /h
Rio Indian, EUA (1990)	Semi-móvel e contínuo	Grua móvel com 1 bomba de jacto	84000	212 m ³ /h
Embocadura de South Lake Worth, EUA (1937)	Fixo e contínuo	1 Bomba de sucção	135000	122 m ³ /h
Embocadura de Masonboro, EUA (1959)	Móvel e periódico	Dragagens de 4 em 4 anos	220000	920000 m ³ por cada operação
Porto de Oceanside, EUA (1943)	Fixo e contínuo	2 Bombas de jacto e 1 bomba em grua móvel	920000	266000 m ³ /ano
Embocadura de Boca Raton, EUA	Fixo e contínuo; móvel e periódica	Draga estacionária de sucção e draga móvel de 10 em 10 anos	124000	70000 m ³ /ano 176000 m ³ de 10 em 10 anos

Em alguns destes casos, os sistemas contínuos aplicados possuem uma capacidade bastante superior ao necessário. Isto leva a crer que estes sistemas funcionam apenas algumas horas por dia ou por alguns períodos de tempo, conforme o necessário. No entanto, estes sistemas são sistemas contínuos permitindo efectuar alimentações sempre que necessário de uma forma mais uniforme e com curtos espaços de tempo entre cada operação.

3.2 Alimentação artificial de areias em Portugal

Com o défice do transporte sedimentar e com a situação originada por algumas estruturas portuárias ao longo da costa Portuguesa, a erosão costeira tem vindo a aumentar. Isto verifica-se no recuo da linha de costa, criando problemas de segurança em zonas urbanas. Para combater este problema, diversas intervenções têm sido executadas em várias praias da costa Portuguesa.

Neste ponto, apresentam-se alguns dos casos de alimentação artificial mais importantes a nível nacional, nomeadamente os casos da Costa da Caparica e de Vale do Lobo, onde se faz uma breve descrição da área em causa e das intervenções adoptadas. De uma forma mais sucinta, refere-se ainda o caso da Ilha da Madeira.

3.2.1 Costa da Caparica

A zona costeira entre a Cova do Vapor e a Costa da Caparica apresenta uma importância relevante, no que diz respeito ao turismo e à área urbana, especialmente na altura do Verão. Localizado na margem sul do estuário inferior do rio Tejo, este sector costeiro tem sofrido importantes recuos da linha de costa. Desde o final do século XIX, esta área costeira sofreu um recuo significativo da linha de costa, mais detalhadamente da restinga que se estendia até ao farol do Bugio. Entre 1929 e 1957, a restinga apresentou um recuo de cerca de 1,5 km, acompanhado por um significativo recuo da linha de costa na frente urbana da Costa da Caparica (Veloso-Gomes *et al.*, 2006a).

Posteriormente, entre 1957 e 1963, a duna recuou 100 metros e a cota da crista da duna diminuiu 6 metros, o que levou a que a frente urbana ficasse exposta as acções directas do mar (Barceló, 1971).

Devido à necessidade de proteger a frente urbana, entre o final da década de 50 e o início da década de 70 foram construídas diversas obras de defesa costeira, nomeadamente, o campo de esporões da Costa da Caparica. Com estas intervenções, a linha de costa manteve-se relativamente estável até 2000. Após alguma degradação das estruturas de defesa, a zona costeira da Costa da Caparica sofreu diversas intervenções de emergência durante o Inverno de 2002/2003, 2003/2004 e 2006/2007 (Veloso-Gomes *et al.*, 2006b).

Na sequência do programa Polis, o INAG solicitou à FEUP/IHRH um estudo sobre a orla costeira da Costa da Caparica, que apresentou 10 soluções de protecção para a Costa da Caparica, considerando todas elas uma reabilitação da obra de defesa existente. A proposta escolhida, consiste em três fases: reperfilamento dos esporões existentes e da obra aderente existente na frente urbana; alimentação artificial das praias e dunas, usando três milhões de metros cúbicos de areia; após monitorização por um período mínimo de cinco anos considerar a possibilidade de remover os três esporões mais pequenos e estender os restantes e equacionar novas operações de alimentação artificial de areias. A primeira fase foi concluída com sucesso, entre Outubro de 2004 e Maio de 2006, com um custo que ronda os oito milhões e duzentos mil euros e um prazo de execução de vinte meses (Veloso-Gomes *et al.*, 2007).

A segunda fase da obra, teve início a 19 de Julho e durou até ao dia 1 de Setembro de 2007, durante vinte e quatro horas por dia, sete dias por semana, procedeu-se à alimentação artificial de areias de um volume total de 50000 m³, cerca de um sexto do valor de 3 milhões de metros cúbicos preconizados pelo estudo FEUP/IHRH. Esta empreitada com um custo de dois milhões e novecentos mil euros, foi realizada com duas dragas Dinamarquesas de sucção e arrasto. Após enchimento dos porões na zona de empréstimo, localizada no canal de navegação de acesso ao porto de Lisboa, no estuário do Tejo, as dragas deslocavam-se até uma distância considerável da zona da praia a encher, onde se encontrava uma bóia e ligações de acoplamento, e efectuavam a repulsão de uma emulsão de areia e água do mar, através de uma tubagem para a praia como mostra a Figura 11 (Veloso-Gomes *et al.*, 2007).



Figura 11 - Operação de repulsão de areias para a praia na Costa da Caparica (Veloso-Gomes *et al.*, 2007)

A tubagem, com cerca de 700 metros de comprimento e 600 milímetros de diâmetro, encontrava-se pousada no fundo marinho. Na zona da praia, o espalhamento e nivelamento das areias foi efectuado com o auxílio a equipamento mecânico terrestre. De salientar que o ciclo completo de dragagem, em que se distinguem as diferentes fases, compostas pela dragagem no local de empréstimo, transporte até à bóia junto da praia, operações de acoplamento da tubagem, repulsão das areias para a praia, desacoplamento e viagem de retorno, tem uma duração de 4 horas (Veloso-Gomes *et al.*, 2007).

3.2.2 Vale do Lobo

A praia de Vale do Lobo, localizada a Sul da costa Portuguesa, em Quarteira, entre Albufeira e Faro, apresenta um areal de 5 km de comprimento e uma barreira de penhascos que servem de protecção da zona urbana. Estando esta praia na região do Algarve, manifesta uma importância relevante no que diz respeito ao turismo.

Desde 1974, com a construção da Marina de Vilamoura e as obras de defesa costeira efectuadas ao longo da costa da Quarteira, houve uma interrupção na reposição de sedimento nas praias a Este destas estruturas, não havendo um equilíbrio e levando a um aumento da erosão nesta zona. O efeito da erosão na praia de Vale do Lobo tornou-se mais evidente entre 1980 e 1983, depois da linha de costa ter recuado cerca de 30 metros na praia de Forte Novo, a Oeste da praia de Vale do Lobo, entre 1976 e 1980. Para minimizar o problema, na década de 80 foram construídas estruturas de defesa costeira na zona do Vale do Lobo Resort, reduzindo a intensidade erosiva e sucessivamente, diminuindo o recuo da linha de costa para valores compreendidos entre 0,6 e 0,7 metros por ano, entre 1990 e 1996 (Marques, 1997).

Em 1998, o Instituto da Água (INAG) executou uma intervenção, através de alimentação artificial de areias, na praia da Falésia. Esta operação consistiu em dragar cerca de 700000 m³ de areia, ao longo da banda frontal da praia, através de uma draga de sucção e arrasto. A área de dragagem localizou-se a 4 km da praia, a cerca de 20 metros de profundidade. A areia foi levada até a praia através de tubagens que se encontravam no fundo marinho, ligadas à draga móvel. Com o início da intervenção em Outubro de 1998 e a sua conclusão na primeira semana de Janeiro de 1999, a extensão do areal nesta praia aumentou em aproximadamente 80 metros. O valor estimado da empreitada foi de cerca de três milhões e duzentos mil euros (Veloso-Gomes *et al.*, 2006c).

3.2.3 Ilha da Madeira

Na ilha da Madeira, situada no Oceano Atlântico, há registo de duas intervenções de alimentação artificial de areias. A primeira intervenção foi na praia da Calheta em 2004, onde houve uma alimentação com cerca de 750000 m³ de areia proveniente de Marrocos, mais pormenorizadamente, do deserto do Sahara. Esta alimentação destinou-se a um trecho de 1,5 km de extensão (Clímaco *et al.*, 2005).

Em Abril de 2008, um forte temporal que fustigou a costa Sul da Madeira fez com que fosse levada pelo mar uma parte desta areia, sendo no Verão de 2008 necessário uma alimentação posterior com a finalidade de repor uma parte da areia perdida (Nóbrega, 2008).

A alimentação artificial de areias mais recente na Ilha da Madeira, ocorreu na praia de Machico, em 2008. Esta intervenção recorreu uma vez mais a areias provenientes de Marrocos, deserto do Sahara, e teve um custo superior a três milhões de euros. A quantidade de areia depositada nesta praia ronda as 22 toneladas, que permitem à praia ter agora uma extensão de cerca de 125 metros. Esta areia foi transportada de barco a partir de Marrocos e depositada na praia (Nóbrega, 2008).

4 DESCRIÇÃO DA BARRA DE AVEIRO

O porto de Aveiro (Figura 12), localizado na região costeira do centro de Portugal, é considerado um porto de primeira classe. Esta classificação justifica-se pela sua importância para a região de Aveiro, em termos de actividades industriais, promovendo oportunidades de emprego que sucessivamente criam condições de fixação na região, funcionando como ligação internacional para a economia local (Pinheiro, 2006).

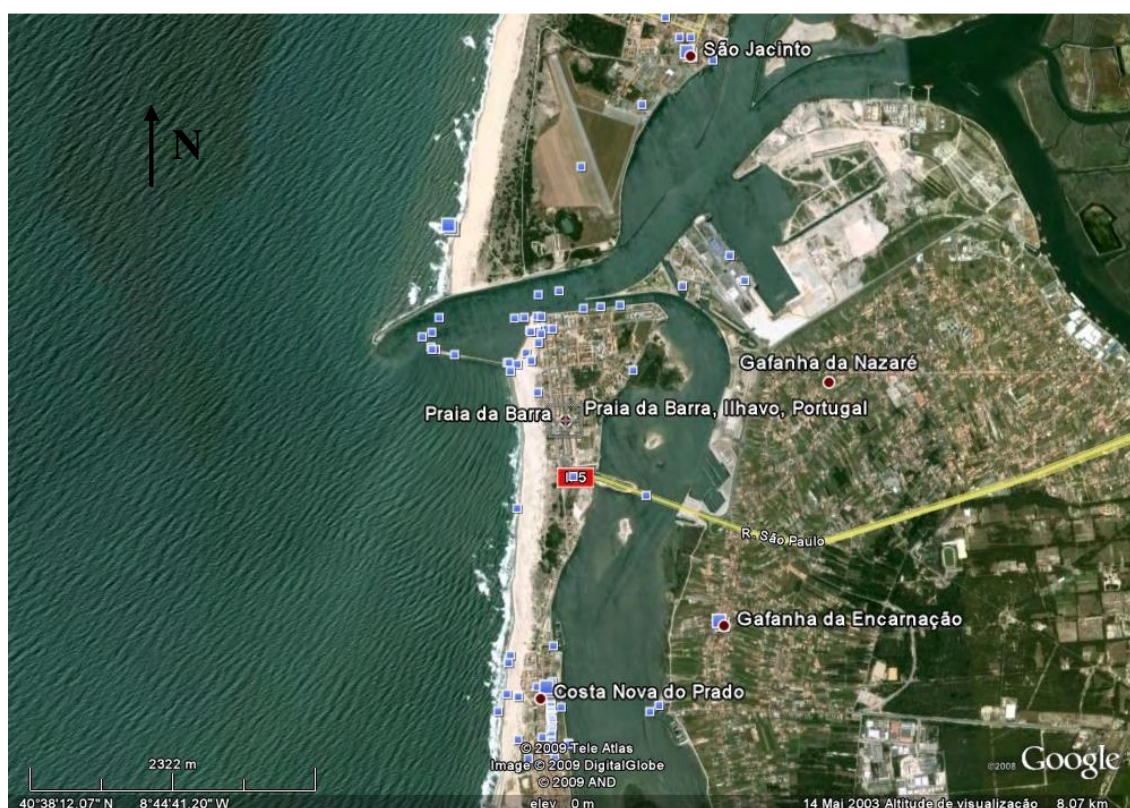


Figura 12 - Barra de Aveiro e respectiva área envolvente (Google Earth, 2008)

As estruturas portuárias (quebramares e canal de acesso), na região da Barra de Aveiro, têm influenciado o transporte litoral de areias ao longo da costa, agravando a erosão das praias a Sul da Barra e originando acreção de sedimentos em S. Jacinto, causando problemas de deposição de sedimentos ao longo do canal. Existem problemas de erosão das praias a Sul da Barra de Aveiro, nomeadamente, entre a Praia da Costa Nova e a Praia

de Mira, reduzindo o cordão de areal que separa o oceano Atlântico do sistema lagunar de Aveiro. Além do déficit sedimentar no litoral Noroeste Português, os factores que têm contribuído para este problema relacionam-se com o grande volume de material sedimentar retido no quebramar Norte, não sendo feita uma reposição de sedimentos nestas praias a Sul.

Segundo o estudo da JAPA (1994), o volume de areias extraído na praia de S. Jacinto, a Norte do quebramar, entre 1980 e 1993, corresponde a cerca de 6 milhões de metros cúbicos. Este valor, resultante de extracções feitas para venda de areias ao ramo da construção civil, apesar de ser um valor aproximado e com alguma incerteza, ajuda a perceber os volumes que ficam retidos nesta zona.

Desde a década de 60, tem-se pensado num sistema de transposição artificial de areias para garantir um equilíbrio. A primeira solução foi proposta em 1967 pela Hidrotécnica Portuguesa, e consistia na instalação de uma estação de bombagem móvel, no quebramar Norte, para recolha das areias acumuladas, e posterior repulsão com bombas de reforço através de um sistema de tubagens enterradas, com descarga em vários locais na Costa Nova (Pinheiro, 2006).

Com o objectivo da posterior modelação numérica da zona da Barra de Aveiro, apresentam-se uma série de grandezas e propriedades que caracterizam a dinâmica sedimentar de Aveiro, nomeadamente as características sedimentares, a acção das ondas e volumes estimados de transporte sólido longitudinal.

4.1 Caracterização sedimentar

De uma forma geral, os sedimentos que recobrem a plataforma continental são constituídos por areias finas, com dimensões médias que variam na ordem dos 0.125 mm aos 0.5 mm. Tendo em conta uma análise de distribuição granulométrica efectuada por Ferreira, em 1993, evidenciam-se três zonas com diferentes diâmetros de sedimento: a zona de entre marés, a zona de barra imersa e a zona para o largo da barra. Junto da zona de marés, os sedimentos são mais grosseiros, sendo a quantidade de finos, de modo geral, insignificante, tendendo a haver mais finos para o largo (Coelho, 2005).

Segundo Ferreira (1998), a amostragem efectuada em Dezembro de 1990 pelo Instituto Hidrográfico e pelo grupo DISEPLA foi a única realizada com o intuito de caracterizar a praia submersa. Nesta, foi possível definir uma ordem de grandeza da dimensão das areias existentes ao longo da zona costeira, na região de Aveiro. A análise dos resultados obtidos nesse levantamento indica, como valores médios da dimensão dos sedimentos na ordem dos 0,3 mm aos 0,4 mm, consoante a distância à linha de costa.

Outros trabalhos efectuados posteriormente por Pereira, em 2000, para caracterização da granulometria das areias recolhidas na zona entre marés de 10 estações localizadas entre a Costa Nova e Poço da Cruz, mostram que as dimensões dos sedimentos variam entre os 0,063 mm e 2 mm (valores característicos das areias). Segundo o autor, na zona próxima da praia, em períodos de maior agitação há um enriquecimento de sedimentos mais grosseiros. Quando a ondulação é mais fraca, o diâmetro médio diminui (Coelho, 2005).

4.2 Agitação marítima

A agitação marítima apresenta-se sobre diversos tipos: ondas, vagas, seichas e tsunamis. As seichas são ondas de oscilação de longo período em que o seu comportamento se traduz em fenómenos de ressonância, que têm particular importância no estudo dos estados de agitação no interior dos portos. Os tsunamis são ondas de translação, resultantes de fenómenos sísmicos de consequências catastróficas. As vagas têm origem do efeito de ventos locais e de ondas provenientes de outros temporais, criando um estado de agitação irregular. As ondas marítimas são mais regulares pois propagam-se longe da zona onde foram geradas. Contudo, existe uma variabilidade das características das ondas dentro do mesmo estado de agitação. Esta variabilidade reflecte-se na maior ou menor irregularidade de alturas e períodos de onda (Coelho, 2005).

Segundo Carvalho e Barceló (1966), as alturas de onda significativas mais frequentes verificadas na costa ocidental portuguesa, variam entre 1 m e 2 m. Este intervalo de valores de onda significativa corresponde a 45% das ocorrências. Alturas de onda superiores a 3 m correspondem a 15% das ocorrências, e alturas de onda superiores a 6 m correspondem apenas a 2% dos registos. 6% das ocorrências correspondem a períodos de calma. Em relação ao período significativo da onda, os valores mais frequentes variam entre os

9 segundos e os 11 segundos, tendo como valores mínimo e máximo, respectivamente, 6 segundos e 18 segundos.

Outros valores de altura de onda significativa e respectivo período, para ondas ao largo da costa Oeste portuguesa, são apresentados por Andrade e Freitas (2002), com valores de onda de 2 m a 2,5 m e período a variar de 9 segundos a 11 segundos. Estas ondas são geradas por ventos de altas latitudes do Atlântico Norte, com proveniência dos quadrantes WNW e NNW. Entre Outubro e Março, as ondas ultrapassam com frequência os 5 m de altura significativa.

4.2.1 Rumos dominantes

No estudo dos rumos de ondulação optou-se por definir várias classes, que correspondem a sectores de 22,5°, centrados na direcção que dá o nome à classe, tal como mostra a Figura 13. Esta definição de classes permite uma comparação dos valores descritos por Barata *et al.* (1996) e por Coelho (2005).

Os valores apresentados por Barata *et al.* (1996) resultam de registos retirados através de bóias ondógrafo direccionais, colocadas em zonas próximas do Cabo Mondego e da Barra de Aveiro, durante os anos de 1990 a 1993 e 1992 a 1993, respectivamente. Para a direcção média do período de pico no ondógrafo colocado no Cabo Mondego, a frequência de ocorrência de rumos no sector NW é cerca de 45% e o conjunto dos quadrantes NNW, NW e WNW ultrapassam os 90% de ocorrências. No ondógrafo colocado na barra, os resultados contêm maior incerteza, pois correspondem a um pequeno período de registos e a bóia está sujeita a fenómenos de refacção por se localizar em zona de menores profundidades. Apesar da menor fiabilidade dos resultados obtidos, estes são semelhantes aos obtidos no Cabo Mondego.

Os valores apresentados por Coelho (2005) resultam de um tratamento de dados registados pelo Instituto Hidrográfico na bóia ondógrafo de Leixões, com registos de 1993 a 2003. Os dados recolhidos demonstram que o quadrante Noroeste é aquele com maior predominância de origem da ondulação, com 88,4% do total dos registos. O sector NW apresenta 42,4% do total dos registos de rumos. As ondas com proveniência do quadrante

de Sudoeste representam apenas 3,9% de total de registos. A classe de direcção de ondulação Oeste apresenta 7,7% dos registos.

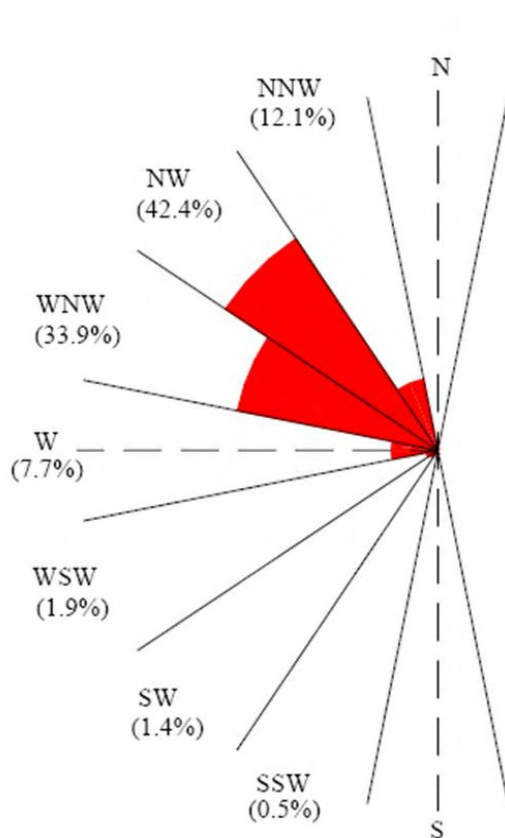


Figura 13 - Representação das classes de direcção de onda com os dados do Instituto Hidrográfico para a bóia de Leixões, entre 1993 e 2003 (Coelho, 2005)

Comparando os resultados com os valores de Barata *et al.* (1996) pode-se concluir que são semelhantes.

4.2.2 Alturas e períodos de onda

Recorrendo ao mesmo conceito usado nos rumos dominantes para comparação de valores de vários autores, agruparam-se as alturas de onda significativa e respectivos períodos de onda em classes de um metro e um segundo respectivamente, como é apresentado na Tabela 2 e Figura 14.

Na Tabela 2, podem-se comparar percentagens de ocorrência de classes de altura de onda significativa apresentadas por vários autores, em diferentes espaços temporais. Conclui-se que os valores são semelhantes nos diferentes autores, sendo a classe 0,5 – 1,5 a que apresentar maior frequência de ocorrências. Existem algumas variações de valores, nomeadamente entre Barata *et al.* (1996) e a restante bibliografia devido à diferente gama de dados utilizados pelos autores. No caso deste autor, ele refere que a classe mais representativa é a 1,5 - 2,5 , apesar dos valores de Leixões e em períodos de registo mais longos indicarem a classe 0,5 – 1,5.

Tabela 2 - Comparação de ocorrências (%) de altura de onda significativa (Coelho, 2005)

<i>Hs (m)</i>	Leixões (1981 a 2003)	Coelho e Veloso-Gomes (2003)	Barata <i>et al.</i> (1996)	Veloso-Gomes (1995)
<0,5	0,99	1,16	0,16	1,60
0,5 – 1,5	40,34	41,83	26,42	45,67
1,5 – 2,5	31,72	31,50	35,07	29,62
2,5 – 3,5	13,29	12,86	19,48	14,91
3,5 – 4,5	5,55	5,08	7,49	5,55
>4,5	8,11	7,56	11,38	2,65

Importa salientar que, de acordo com Coelho (2005), as alturas de onda máximas ocorrem com mais frequência durante o Inverno, ou seja, de Novembro a Março, e as classes de onda mais baixas ocorrem com mais frequência no Verão.

Para análise dos períodos de onda também é importante diferenciar os registos de Inverno e de Verão. Nos meses de Inverno os períodos de onda perdem significado para classes inferiores a 7 segundos e os meses de Verão não têm representatividade nas percentagens correspondentes a classes superiores a 13 segundos. Quer isto dizer que, as alturas de onda superiores correspondem também a períodos de onda maiores, mais frequentes durante o

Inverno, e as alturas de onda inferiores correspondem a períodos mais curtos e com maior frequência de ocorrência nos meses de Verão (Coelho e Veloso-Gomes, 2003).

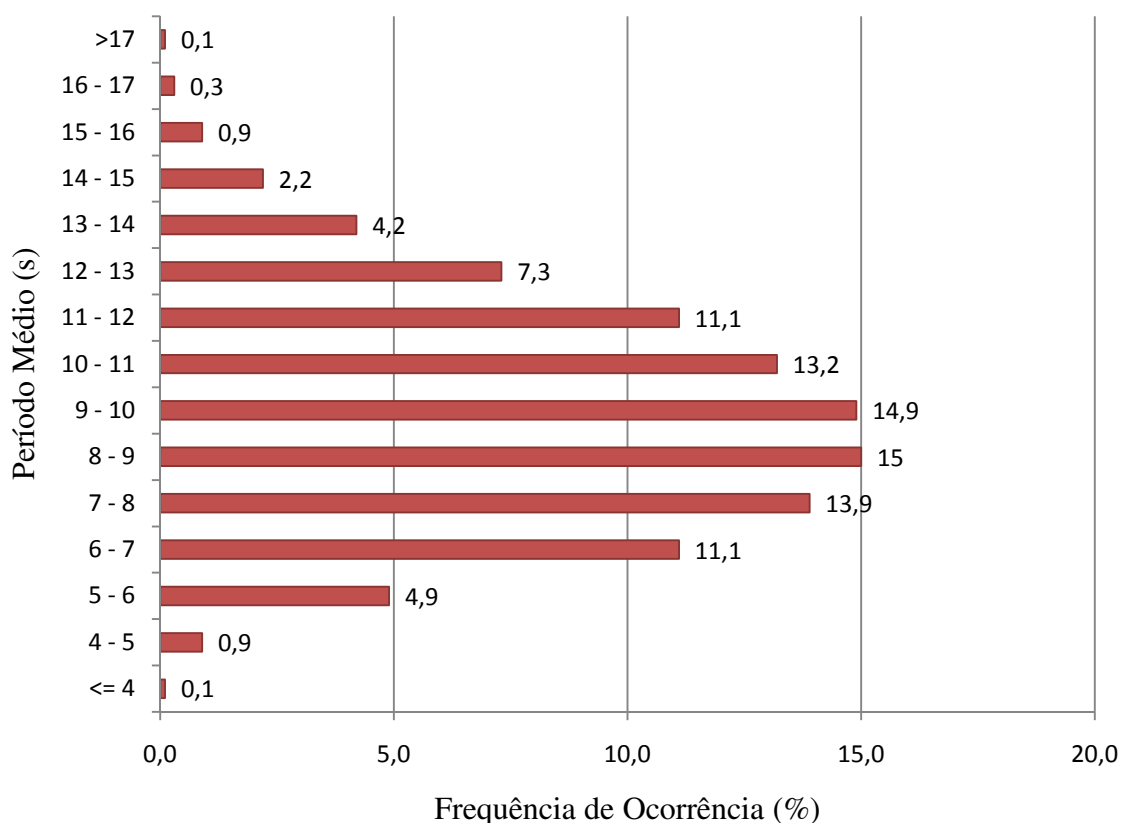


Figura 14 - Frequência de ocorrência do período médio de onda na bóia de Leixões de 1981 a 2003 (Coelho, 2005)

4.3 Volumes de transporte sólido

Na presente secção são referidos alguns dos valores que caracterizam os volumes sedimentares em transporte na costa Noroeste de Portugal, entre o rio Douro e o Cabo Mondego. Seria essencial determinar o valor total do volume de sedimentos resultante do transporte longitudinal na área em estudo, de forma a prever a quantidade de sedimentos disponíveis para a alimentação das praias, já que a deriva litoral é a principal responsável pelo transporte de sedimentos na costa ocidental portuguesa (Diogo, 2004). No entanto os valores reais do transporte sedimentar não estão disponíveis ou não existem. Para dar uma

ideia dos valores da capacidade de transporte do mar ao longo da costa Portuguesa, existem algumas referências que indicam valores aproximados na ordem de 1 milhão de metros cúbicos por ano (Veloso-Gomes *et al.*, 2006c).

A elevada energia da agitação marítima existente na costa Oeste portuguesa faz com que seja considerada uma das costas mais activas da Europa. A enorme quantidade de energia libertada pela rebentação das ondas, leva a que haja um intenso volume de transporte sedimentar na direcção Norte-Sul ao longo de toda a costa Oeste de Portugal. Estima-se que o valor do volume de transporte sedimentar varie, em valor líquido, entre 1 milhão e 2 milhões de metros cúbicos por ano (Andrade e Freitas, 2002).

No entanto, outros valores são referenciados, de acordo com o trabalho de Oliveira (1997), a capacidade de transporte por acção das ondas é estimada na ordem dos 2 milhões de metros cúbicos por ano.

No caso do autor Diogo (2004), refere que Teixeira em 1997 situou o valor do transporte longitudinal entre 1,7 milhões e 1,8 milhões de metros cúbicos por ano, expondo que o volume necessário para combater o fenómeno de erosão das praias teria que ser da ordem dos 2 milhões a 2,2 milhões de metros cúbicos por ano.

Segundo Veloso-Gomes *et al.* (2006c), a capacidade de transporte sedimentar das ondas oblíquas à costa Noroeste portuguesa varia entre 1 e 2 milhões de metros cúbicos por ano, sendo depositados pelos rios apenas 0,2 milhões de metros cúbicos por ano de sedimentos.

De referir que de acordo com Veloso-Gomes *et al.* (2006c), entre os anos 50 e 70, a quantidade de sedimentos retidos a Norte do Quebramar Norte do porto da barra de Aveiro era de cerca de 20 milhões de metros cúbicos, o que corresponde mais ou menos a um transporte sedimentar de 1 milhão de metros cúbicos por ano.

Analisando os valores expostos pode-se constatar que a ordem de grandeza do transporte longitudinal de sedimentos na costa Noroeste portuguesa, se traduz num balanço anual médio líquido no sentido Norte-Sul que se aproximará dos 1.5 milhões de metros cúbicos.

É importante distinguir a situação de transporte bruto e de transporte líquido, já que a orientação da agitação marítima incidente conduz a uma alternância do sentido de

transporte, sendo a capacidade total de transporte das ondas estimada em vários milhões de metros cúbicos por ano (Coelho, 2005).

4.4 Batimetria, topografia e intervenções de defesa costeira

Para efectuar os testes numéricos no modelo LTC, foi necessário introduzir vários elementos, entre os quais a caracterização do terreno na zona de Aveiro, desde a batimetria ao largo até à topografia da zona terrestre. Para tal, recorreu-se à base batimétrica e topográfica utilizada por Coelho (2005).

A região caracteriza-se por uma topografia de cotas baixas na zona terrestre adjacente à ria e à zona costeira, tal como demonstra a Figura 15.



Figura 15 - Topografia da zona costeira da Barra de Aveiro (Google Earth, 2009)

A batimetria é muito suave, variando até à cota -10 metros (ZH), a uma distância média de 1.5 Km da linha de costa. As linhas batimétricas são praticamente paralelas à costa e apresentam declives muito pequenos (Figura 16).

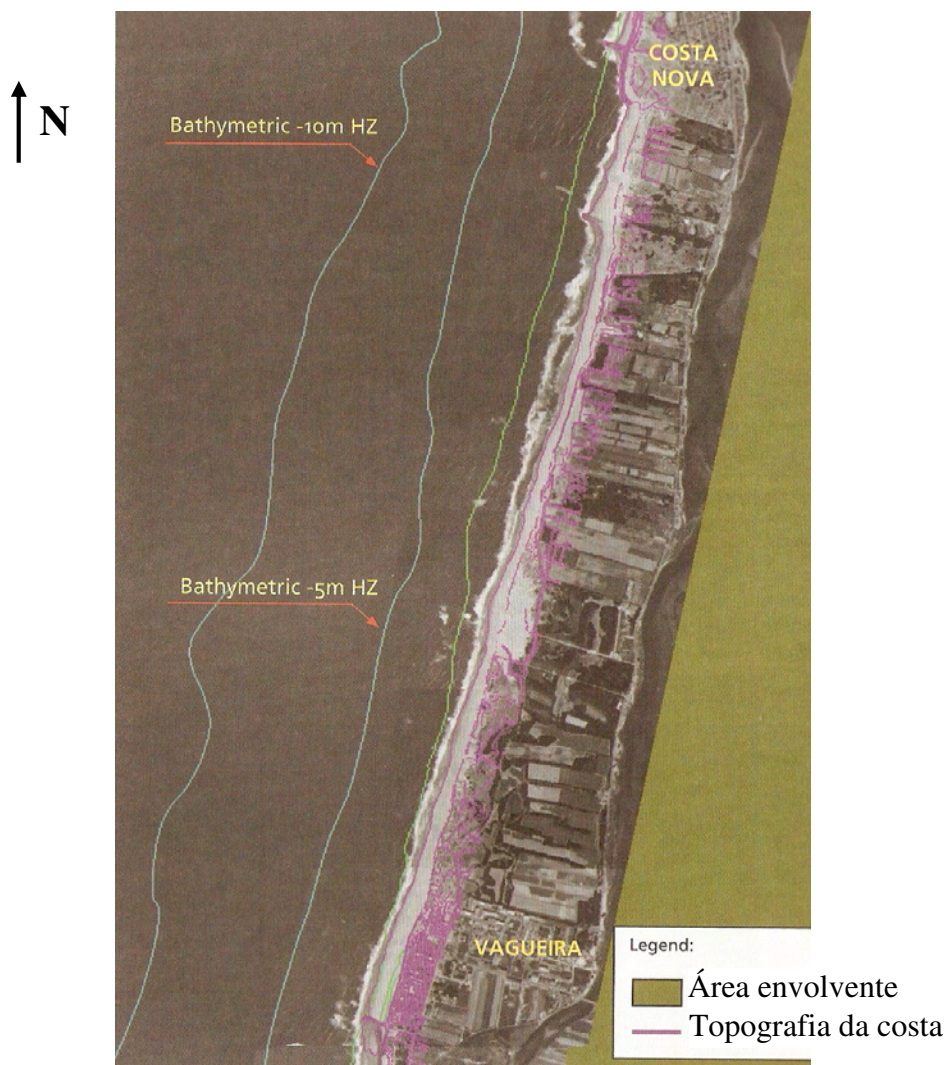


Figura 16 - Batimetria da zona costeira de Aveiro (Veloso-Gomes *et al.*, 2006c)

A Figura 17 representa uma área de 40x40 Km², com as características da altimetria da região de Aveiro idêntica à utilizada por Coelho (2005). As coordenadas de referência do ponto mais a Sul desta área, relativas ao Datum Lisboa são $x = 110000$ m e $y = 375000$ m.

Como se demonstra na representação dos dados topográficos e batimétricos referentes à zona costeira de Aveiro (Figura 17), a batimetria até à cota -30 metros (ZH) e a uma distância média de 5 Km da costa apresenta declives pequenos. A partir desta cota os declives entre as linhas batimétricas aumentam de uma forma mais significativa e à medida que se distanciam da costa.

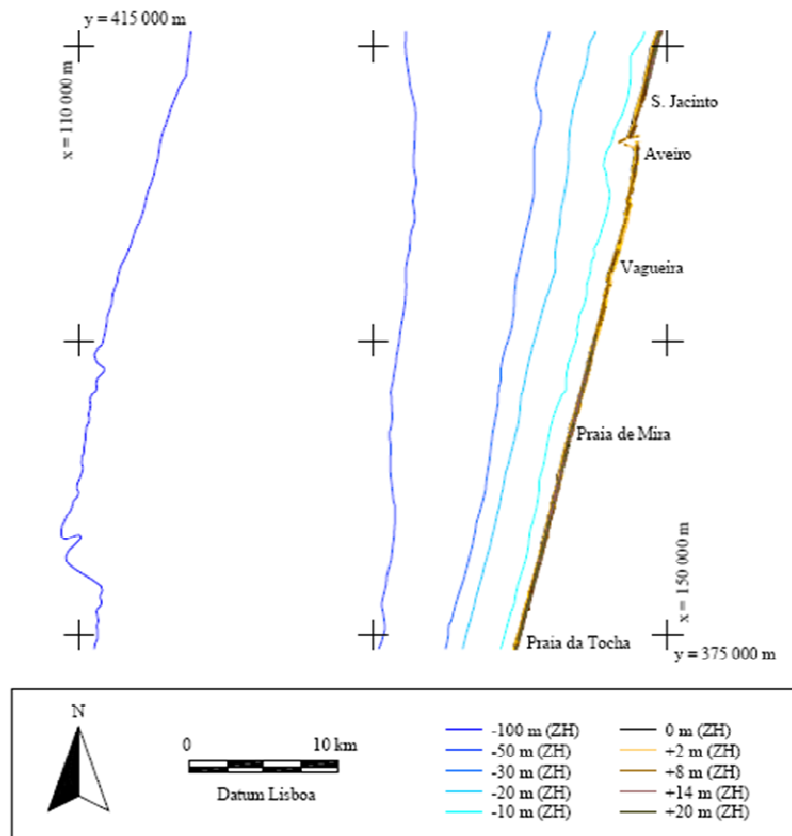


Figura 17 - Representação dos dados topográficos e batimétricos referentes a zona de estudo (Coelho, 2005)

Outro elemento necessário para definir a região de Aveiro é a representação das intervenções de defesa costeira existentes ao longo da costa (Figura 18).

As obras existentes na Barra são os dois quebramares que permitem o acesso ao porto de Aveiro.

Segundo CRL (1998), relativamente às obras de defesa costeira presentes na Costa Nova destacam-se os cinco esporões complementados por uma defesa frontal aderente (Figura 18a). Os quatro esporões mais a Norte da Costa Nova, representados na Figura 18a por E1, E2, E3 e E4, foram construídos em 1972 com um comprimento de 120 metros. O último esporão da Costa Nova, E5, foi construído mais tarde em 1979, diferenciando-se dos outros com um comprimento de 100 metros. Relativamente às obras aderentes existentes na Costa

Nova, foram construídas em 1981 e prolongam-se ao longo de uma extensão de 1050 metros a partir do esporão E3 (Veloso-Gomes *et al.*, 2006c).

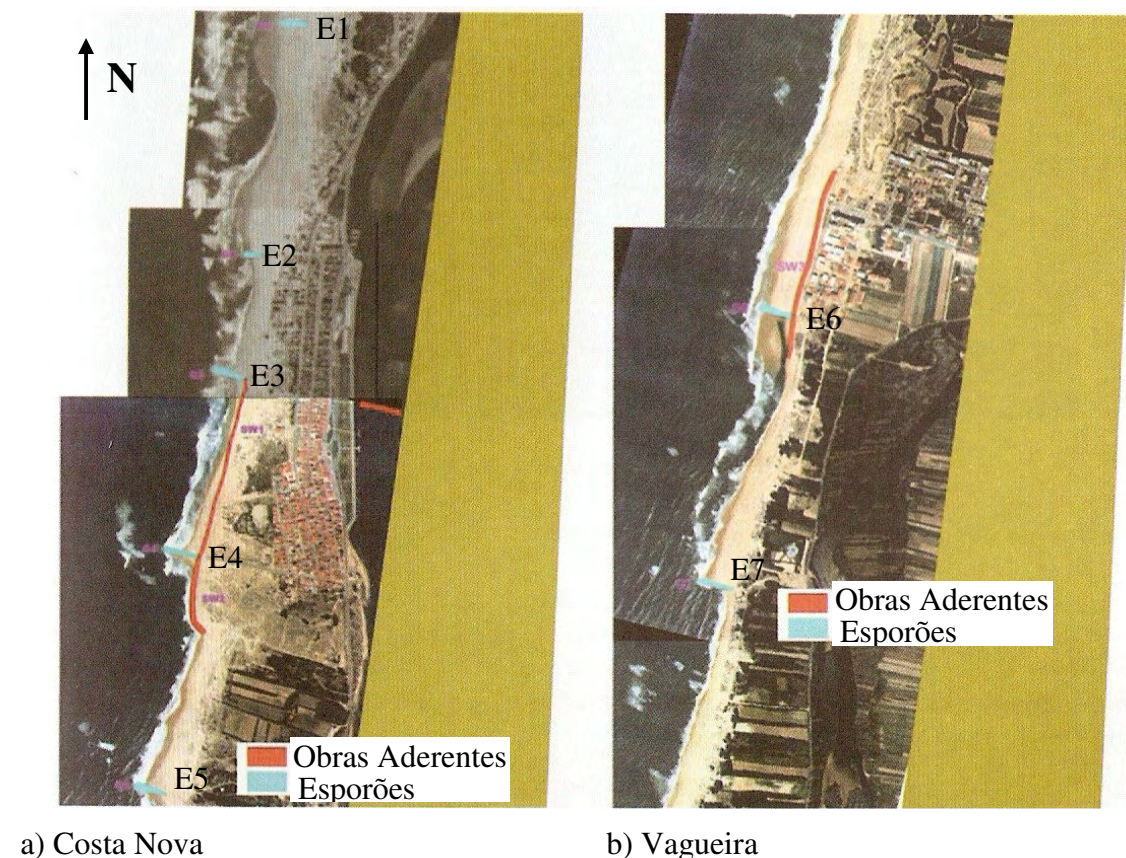


Figura 18 - Esquematisação das obras de defesa costeira da região de Aveiro (Veloso-Gomes *et al.*, 2006c)

O sistema de defesa costeira presente na Vagueira é composto por dois esporões e uma defesa frontal aderente com enrocamento. As obras de defesa frontal aderente com enrocamento da Vagueira começaram a ser executadas em 1978, prolongando-se ao longo da praia, com uma extensão de cerca de 800 metros. Antes de 1984, foram executados os dois esporões da Vagueira com um comprimento de cerca de 130 metros (Veloso-Gomes *et al.*, 2006c). A Sul da Vagueira encontra-se o esporão do Areão e mais a Sul, o de Poço da Cruz, sendo o único tipo de defesa costeira presente nesta zona. Estes dois esporões foram construídos em 2003 de acordo com o preconizado no Plano de Ordenamento da Orla Costeira de 1998 (Coelho, 2005).

Por fim, em Mira, as obras de defesa costeira presentes são constituídas por dois esporões consideravelmente distanciados um do outro.

Para além destas estruturas apresentadas, foram executadas nesta zona outras obras de defesa costeira. Estas intervenções mais “suaves”, em relação às anteriormente descritas, incidiram na recuperação do sistema dunar, plantação e re-vegetação do sistema dunar.

De referir, que se registaram ao longo do tempo algumas roturas do sistema dunar nesta zona costeira. Nestes casos, foram efectuadas algumas intervenções de emergência de forma a evitar o agravamento da situação. As intervenções basearam-se na construção de um sistema dunar artificial e na reposição das areias na praia recorrendo a alimentações artificiais de areias (Veloso-Gomes *et al.*, 2006c).

4.5 Sistemas mais adequados à Barra de Aveiro

Perante a caracterização apresentada, julga-se que os sistemas mais adequados à região de Aveiro serão os fixos ou semi-móveis, pois existe uma zona de retenção de sedimentos que poderá ser usada para extracção das areias que irão alimentar as praias a Sul. Contudo, esta análise por si só não chega para a escolha do sistema mais eficiente para o caso da Barra de Aveiro. Para sustentar uma eventual opção, foram executados alguns testes onde se simularam os vários sistemas de transposição artificial de areias, nomeadamente um sistema fixo com alimentação contínua e um sistema fixo ou semi-móvel com alimentação periódica e por áreas. Estas soluções foram estudadas com o auxílio de modelação numérica, recorrendo assim a diversas alternativas de colocação das areias nas zonas pretendidas.

São necessários estes testes para uma escolha mais sustentada e com resultados que provem qual a forma mais adequada de combater a erosão costeira, ou pelo menos minimizar os efeitos deste fenómeno.

5 MODELAÇÃO DA EVOLUÇÃO DA LINHA DE COSTA

Uma forma cómoda de se referir uma faixa costeira é através de uma linha que represente a transição entre a zona terrestre e a zona aquática, designada de “linha de costa”. Normalmente, a linha de costa é referida à intercepção do plano da superfície do nível do mar com a superfície do terreno. Na realidade, esta linha é dinâmica e depende de vários factores e parâmetros. Assim sendo, é necessário recorrer à modelação de forma a simular e tentar prever a evolução da configuração da linha de costa ao longo do tempo.

O conhecimento do comportamento e evolução da linha de costa é muito importante, nomeadamente para o planeamento e gestão de zonas costeiras (Coelho, 2005).

Numa perspectiva de tentar perceber o impacto da transposição artificial de areias na barra de Aveiro, procedeu-se à modelação da evolução da linha de costa de acordo com diversos cenários. Os cenários estudados neste trabalho permitiram comparar resultados de alimentações mais ou menos frequentes e até contínuas, bem como a localização das areias, mais em profundidade, mais afastadas da Barra ou aplicadas numa maior extensão da praia e zona imersa.

5.1 Modelo LTC

O programa LTC (Coelho, 2005) foi idealizado para melhorar a capacidade de previsão da evolução da linha de costa ao longo dos anos. O LTC (Long-Term Configuration) permite prever e simular o comportamento da configuração da linha de costa ao longo do tempo, através da análise de uma série de conceitos associados ao transporte de sedimentos, apesar de possuir um grau de incerteza muito elevado, que reflecte o estado do conhecimento actual dos fenómenos e processos de transporte sedimentar costeiro.

Este programa destina-se a praias arenosas e permite estudar várias características que condicionam o transporte sedimentar e posterior alteração da linha de costa. O modelo depende da altura de onda considerada e permite também a variação do nível de água por efeito das marés e subida do nível do mar. Para estimativa do transporte sólido recorre à fórmula CERC e por balanço de massas nos perfis transversais permite simular a evolução

da linha de costa. Para efectuar estes estudos no programa é necessário conhecer as ondas, correntes, ventos, níveis de água, natureza dos sedimentos e sua fonte e as condições fronteira nos extremos da grelha modelada (Coelho, 2005).

Assim sendo, o programa tem o objectivo de projectar cenários de evolução da linha de costa e apoiar a escolha de soluções de engenharia mais adequadas em termos técnicos, ambientais e sócio-económicos.

5.2 Definição das condições de modelação

No presente estudo, adoptou-se um clima de agitação fixo, constante ao longo do tempo, por se entender que assim será mais fácil comparar resultados entre os diversos testes.

Para efectuar as primeiras análises, pretendeu-se adoptar uma onda com características constantes no tempo e que resultasse na capacidade de transporte sólido similar à realidade da costa Noroeste Portuguesa. De acordo com os valores do volume de transporte sólido apresentados pelos diversos autores na bibliografia recolhida, adoptou-se para este estudo um volume de transporte sedimentar de 1,5 milhões de metros cúbicos por ano.

Para determinar a altura de onda a usar recorreu-se à fórmula CERC, que permite determinar a quantidade de transporte sólido (Equação 1). Nesta expressão são considerados o coeficiente de proporcionalidade (k), o ângulo da crista de onda com batimetria (α) e a altura de onda na rebentação (H_b), entre outros.

$$Q_l = k \left(\frac{\rho \sqrt{g}}{16k_b^{\frac{1}{2}} (\rho_s - \rho)(1-n)} \right) H_b^{\frac{5}{2}} \sin(2\alpha) \quad (1)$$

Adoptando um volume de transporte sólido e fixando os outros parâmetros, foi possível estimar a altura de onda com determinada capacidade de transporte. Os valores adoptados para os parâmetros necessários no cálculo da altura de onda através da fórmula CERC são apresentados na tabela 3 e figura 19.

Com base na bibliografia recolhida, a dimensão de sedimentos que melhor caracteriza a região de Aveiro é de 0,3 mm. Justifica-se a escolha deste valor com base nos vários valores recolhidos durante a investigação de informação e porque os sedimentos mais activos são os finos. Este valor encontra-se na gama de valores apresentados pelos diversos autores.

Contudo, na estimativa do transporte sólido através da fórmula CERC não há dependência da dimensão dos sedimentos.

Tabela 3 - Parâmetros adoptados no cálculo da altura de onda

Q	k	α	k_b	ρ_s	ρ	n	g
(m ³ /ano)		(°)		(kg/m ³)	(kg/m ³)		(m/s ²)
1.5x10 ⁶	0.39	5	0.78	2650	1027	0.4	9.81

A partir deste cálculo, verifica-se que, com uma onda de 1,5 m de altura, a actuar de forma constante ao longo do ano, o transporte sólido obtido é de aproximadamente 1,5x10⁶ m³/ano. Esta altura de onda e o correspondente rumo equivalem aproximadamente ao clima de agitação que caracteriza a região. Adoptou-se, na modelação, um rumo de onda de 70° com o Norte cartográfico, que se situa no sector WNW. Optou-se por este valor por estar compreendido no conjunto de quadrantes com maior frequência de ocorrência, nomeadamente no sector WNW, que é o segundo sector com maior ocorrência a seguir ao NW, com cerca de 40% do total das ocorrências. A escolha da localização, no sector com mais ocorrências, justifica-se por se optar por um clima de agitação fixo e com uma altura de onda “intermédia”.

Assim, as características adoptadas para a onda constante no tempo foram uma altura de onda de 1.5 metros e rumo de 70° com o Norte.

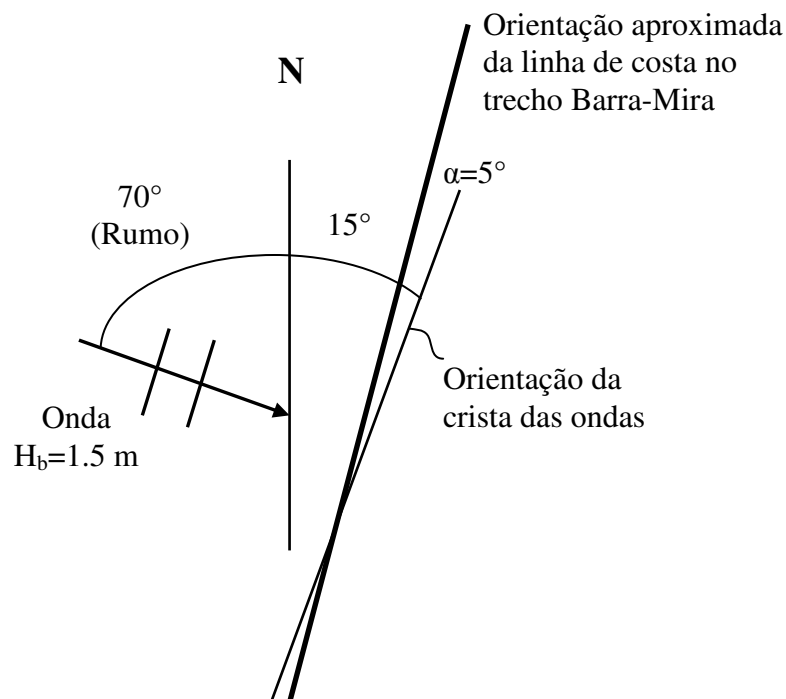


Figura 19 - Esquema do clima de agitação adoptado nos testes do LTC

Em termos de fronteiras, definiram-se todas as obras costeiras existentes ao longo da costa de Aveiro, de acordo com a Figura 18. Para além de ser necessário definir estas condições fronteira da área modelada, foi essencial adoptar outro tipo de factores. O volume sólido a entrar na fronteira Norte é determinado pelo programa considerando a média dos caudais sólidos dos três perfis imediatamente a seguir. Em relação ao volume sólido a sair na fronteira Sul da área modelada, é calculado a partir da média dos caudais sólidos correspondentes às três secções imediatamente antes.

Decidiu-se efectuar os estudos para uma projecção a 50 anos, controlando os resultados de 10 em 10 anos ao longo de perfis transversais (perfis de controlo) espaçados 4300 metros entre si e através da representação da configuração da linha de costa. Foram registados os volumes de transporte sólido em cada um dos perfis de controlo, avaliando-se também o respectivo balanço sedimentar.

Na Figura 20 estão representadas as obras de defesa costeira existentes na Barra (dois quebra-mares), Costa Nova (cinco esporões e uma obra de defesa frontal aderente), Vagueira (dois esporões e uma obra de defesa frontal aderente), Areão (um esporão), Poço da Cruz (um esporão) e Mira (dois esporões). Também se encontram indicados na Figura 20 os perfis de controlo, que correspondem às secções onde se registaram os resultados das simulações feitas.

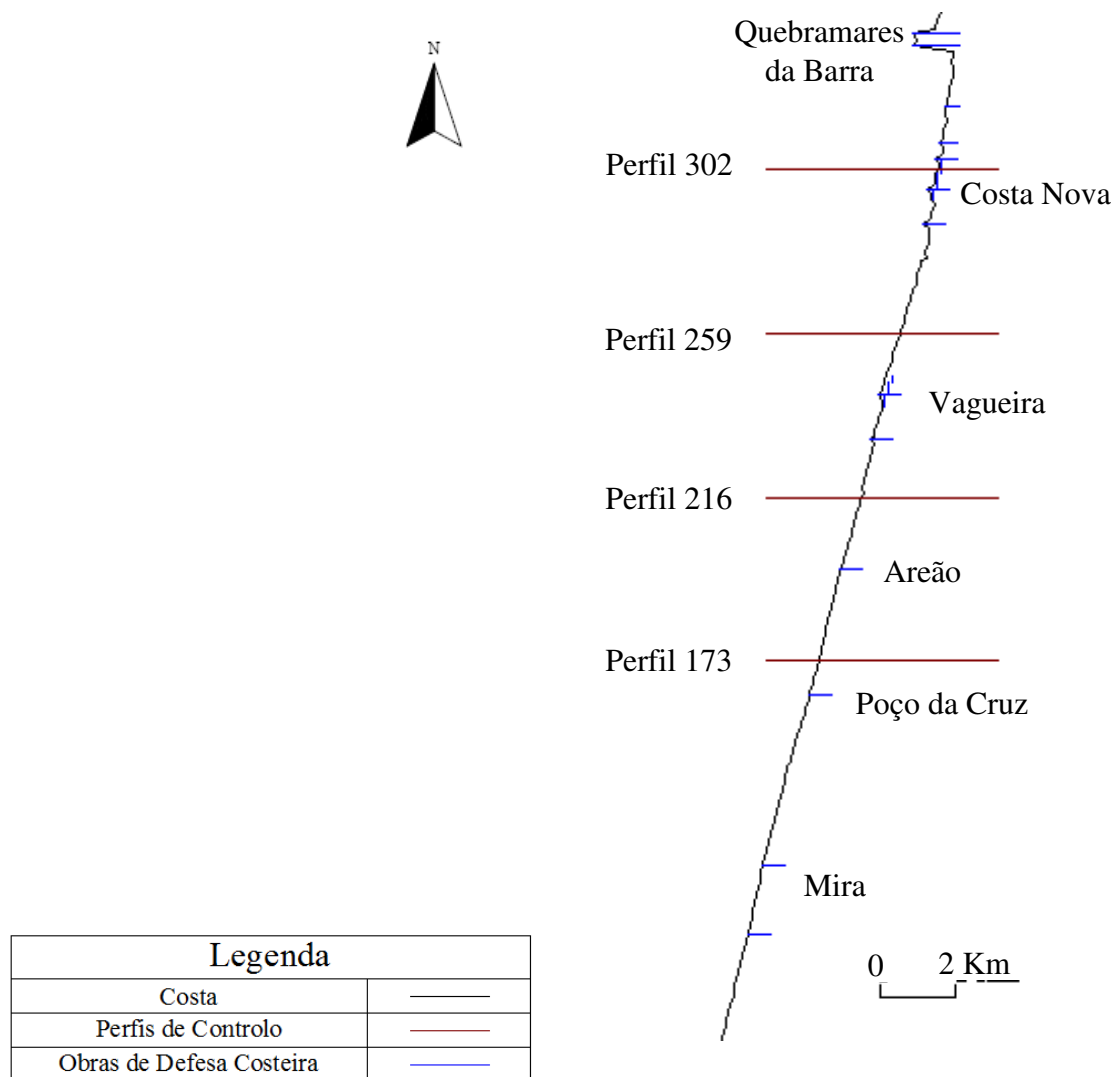


Figura 20 - Área de modelação no LTC

5.3 Testes efectuados

Efectuaram-se diversos testes, simulando a quantidade de sedimentos a transpor a Barra, o local de depósito dos sedimentos, a área de depósito ocupada, o tempo gasto na operação de alimentação de areias, entre outros que se encontram descritos nos capítulos seguintes deste trabalho.

As soluções estudadas, agrupam-se em dois tipos de transposição artificial de areias: alimentações contínuas e alimentações localizadas. De referir, que o local de recolha dos sedimentos é o mesmo em todos os ensaios efectuados, localizado a Norte do quebramar Norte da barra de Aveiro.

5.3.1 Alimentações Contínuas

Na primeira situação optou-se por uma de transposição artificial contínua. Simulou-se a retirada de areias de um perfil localizado em S. Jacinto (a Norte do quebramar Norte da barra de Aveiro) e colocação num perfil localizado nas praias a Sul deste, simulando uma deposição de sedimentos. Com este conceito de transposição artificial de areias contínua, testaram-se cinco situações diferentes, conjugando duas localizações diferentes de depósito dos sedimentos extraídos com 2 caudais sólidos distintos a transpor a Barra, com auxílio de bombas, desde a praia de S. Jacinto. Foi ainda testada uma situação de não intervenção, correspondente a não haver alimentação de sedimentos a sotamar da Barra.

Nesta situação a retirada de sedimentos é feita de forma uniforme ao longo de toda a largura activa do perfil transversal, sendo que a sua deposição a sotamar também é realizada de forma uniforme na respectiva largura activa do perfil de deposição.

Sendo assim, para a primeira localização do perfil de depósito escolheu-se um local a sotamar do quebramar Sul da barra de Aveiro, a cerca de 400 m do quebramar, tal como mostra a Figura 21. Esta localização será designada por “Perfil 330”, pois a localização pretendida corresponde ao perfil 330 no programa LTC.



Figura 21 - Esquema demonstrativo da zona de extracção e de deposição do Perfil 330 (Google Earth, 2009)



Figura 22 - Esquema demonstrativo da zona de extracção e de deposição do Perfil 315 (Google Earth, 2009)

A segunda localização corresponde ao perfil 315 no programa e situa-se a cerca de 1700 m do quebramar Sul do porto da barra de Aveiro. Este local irá-se designar por “Perfil 300” e encontra-se imediatamente a sotamar do primeiro esporão da praia da Costa Nova (Figura 22).

Para cada uma das duas localizações efectuaram-se três testes, em que se fez variar o caudal sólido a transpor a Barra. Os caudais usados para as diferentes quantidades de sedimentos a depositar na praia foram $0 \text{ m}^3/\text{h}$, $50 \text{ m}^3/\text{h}$ e $120 \text{ m}^3/\text{h}$. Foram escolhidos estes volumes de transporte por representarem uma situação em que não se procede a qualquer alimentação ($0 \text{ m}^3/\text{h}$), uma correspondente a um volume de acréscimo com cerca de 1 milhão de metros cúbicos por ano ($120 \text{ m}^3/\text{h}$) e por fim, $50 \text{ m}^3/\text{h}$ representando uma situação intermédia. Os volumes de sedimento transpostos ao fim dos 50 anos de simulação correspondentes a cada um dos caudais de alimentação apresentam-se na Tabela 4.

Tabela 4 - Volumes de sedimentos transpostos na Barra, ao fim de 50 anos, nas alimentações contínuas

Volumes Transpostos (m^3)	
$50 \text{ m}^3/\text{h}$	21900000
$120 \text{ m}^3/\text{h}$	52560000

5.3.2 Alimentações localizadas

No que diz respeito às alimentações localizadas, foram ensaiadas oito situações no programa LTC. Neste caso, a extracção e a deposição correspondem a áreas onde se retiram ou distribuem os sedimentos de forma uniforme. A área de extracção foi fixa ($300 \times 500 \text{ m}^2$) em todos os testes efectuados. As áreas de deposição variam nos diversos cenários, incluindo até a localização. Em geral realizou-se a deposição dos sedimentos a Sul do Perfil 330 e uma vez a Sul do Perfil 315.

Para o Perfil 330 foram ensaiadas sete situações diferentes e para o Perfil 315 foi simulada apenas uma situação.

Neste tipo de alimentação artificial de areias, a extracção e a deposição de sedimentos é feita por áreas de actuação, mas seguindo a mesma metodologia usada nas alimentações contínuas, pretende-se simular a retirada de areias de uma área localizada num perfil em S. Jacinto e colocação das areias numa determinada área nas praias a Sul.

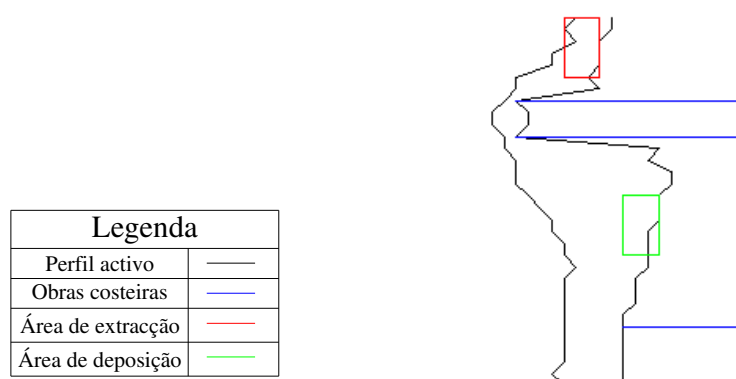


Figura 23 - Teste 1: Alimentação na área 300x500 m², ao longo da praia

Como primeiro teste, simulou-se uma área de depósito de 300x500 m² ao longo da praia (Figura 23) e localizada no Perfil 330. A intervenção de deposição simulada neste primeiro teste localiza-se imediatamente a Sul do quebramar Sul da Barra de Aveiro. Adoptou-se para a operação de acréscimo de sedimentos cerca de um mês de trabalhos, correspondentes a 720 horas de simulação, iniciadas no início dos 50 anos de modelação. Neste primeiro teste, o volume de sedimentos colocados de 1.5 milhões de metros cúbicos distribuídos pela área de deposição.

Como segundo teste, simulou-se a mesma situação anterior, usando uma área de 300x500 m² em que a operação dura um mês, só que desta vez a área de deposição escolhida estende-se mais na transversal em relação à praia e menos na direcção longitudinal (Figura 24). O volume de sedimentos depositados neste teste foi também de 1.5 milhões de metros cúbicos.

Legenda	
Perfil activo	—
Obras costeiras	—
Área de extracção	—
Área de deposição	—

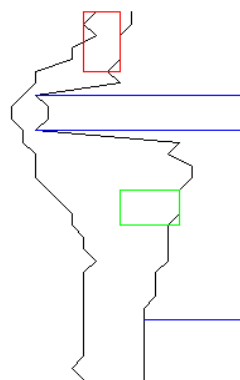


Figura 24 - Teste 2: Alimentação na área 300x500 m², transversal à praia

No terceiro teste simulou-se uma área de deposição de 100x1500 m², orientada ao longo da praia, e localizada a Sul do mesmo Perfil 330. Tal como nos ensaios anteriores, a duração da operação de deposição de areias foi de um mês e simulou-se a deposição de 1.5 milhões de metros cúbicos de sedimentos ao longo da zona de deposição (Figura 25). Com este teste, pretende-se entender de que forma variam os resultados no caso de se recorrer a uma área igual à usada nos dois testes iniciais (300x500 m²) mas com diferente disposição.

Legenda	
Perfil activo	—
Obras costeiras	—
Área de extracção	—
Área de deposição	—

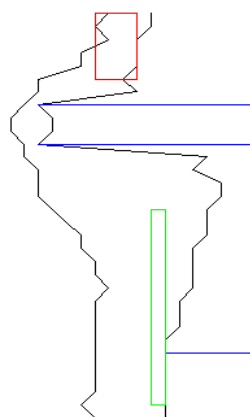


Figura 25 - Teste 3: Alimentação na área 100x1500 m², ao longo da praia

No quarto teste mantiveram-se todas as condições, mudando apenas a área de alimentação para uma área de 300x500 m² localizada a meio do perfil activo no Perfil 330 (Figura 26).

Nesta simulação, a deposição dos 1.5 milhões de metros cúbicos de sedimentos foi efectuada numa zona mais afastada da costa em relação aos testes anteriores.

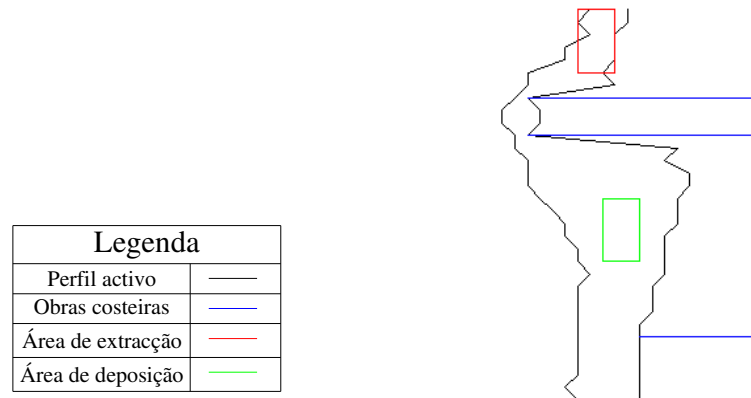


Figura 26 - Teste 4: Alimentação na área 300x500 m², ao longo da praia e a meio do perfil activo

Para a quinta simulação modificou-se apenas a área de alimentação para 600x1000 m², o dobro da área simulada anteriormente, com a finalidade de analisar de que forma se irão alterar os valores quando se aumenta a área de alimentação e reduz a espessura da camada dos sedimentos colocados em cada instante (Figura 27). O volume de sedimentos colocados é o mesmo, 1.5 milhões de metros cúbicos de sedimentos, só que neste caso este volume é distribuído por uma área maior.

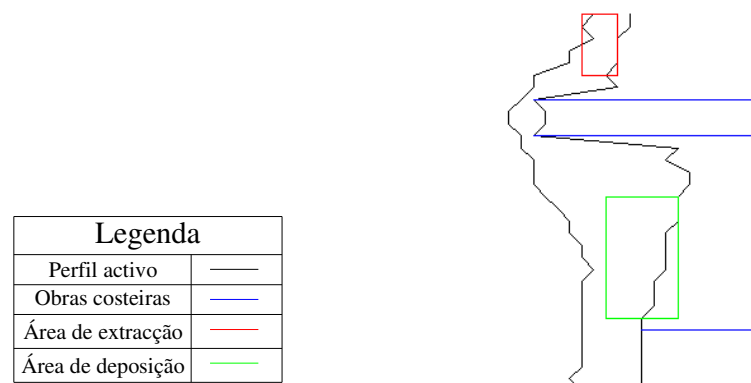


Figura 27 - Teste 5: Alimentação na área 600x1000 m², ao longo da praia

No sexto ensaio, fixou-se a área de alimentação em $300 \times 500 \text{ m}^2$, com uma duração de um mês por operação de alimentação. Esta intervenção foi dividida em oito operações de acréscimo de sedimentos ao longo dos 50 anos, simulando intervenções aproximadamente de 6 em 6 anos. O volume de sedimentos depositados em cada uma das oito intervenções foi de 187500 metros cúbicos. O volume total da alimentação ao fim das oito intervenções foi de 1.5 milhões de metros cúbicos de sedimentos. O perfil de referência para o depósito mantém-se o Perfil 330 (Figura 28).

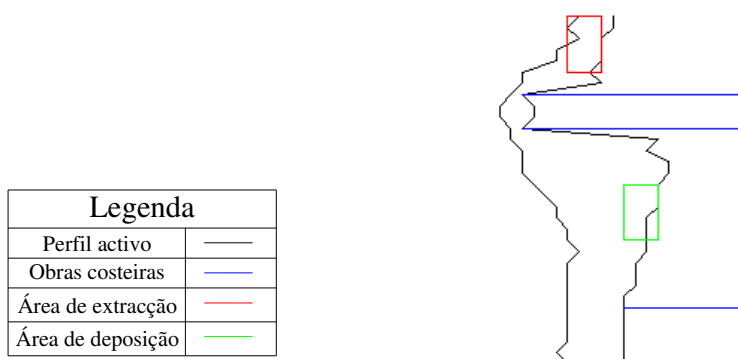


Figura 28 - Teste 6: Alimentação na área $300 \times 500 \text{ m}^2$, ao longo da praia através de 8 intervenções

Os valores do volume de sedimentos a depositar usados na simulação do teste 6, justifica-se por se aproximar de uma solução de transposição artificial contínua, permitindo comparar ambas as soluções.

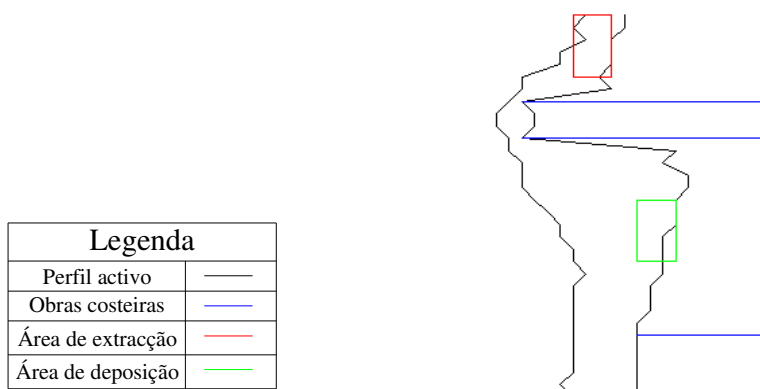


Figura 29 - Teste 7: Alimentação na área $300 \times 500 \text{ m}^2$, ao longo da praia durante 6 meses

Na Figura 29, apresenta-se a área de modelação no LTC para o último ensaio no Perfil 330. Nesta simulação, para a mesma área de modelação da alimentação, adoptou-se uma situação em que a operação em vez de demorar um mês, demorava seis meses. O volume de sedimentos envolvido neste teste é de 1.5 milhões de metros cúbicos.

Para a localização de depósito no Perfil 315, apenas foi estudada uma situação igual ao primeiro teste efectuado (Teste 1) para o Perfil 330 (Figura 30).

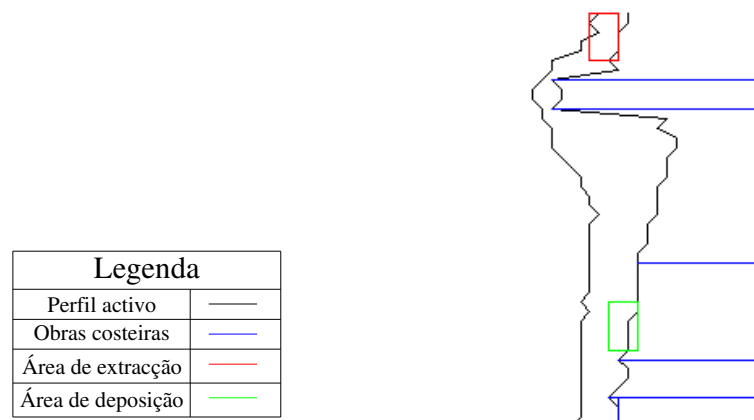


Figura 30 - Teste 8: Alimentação na área 300x500m², ao longo da praia no Perfil 315

6 Análise dos resultados

Relativamente às diversas simulações efectuadas no programa LTC, obtiveram-se diferentes resultados. Torna-se por isso necessário analisar e comparar os resultados obtidos para os diferentes casos estudados, confrontando os resultados com as características presentes em cada simulação.

Na análise de cada simulação, comparam-se os caudais de transporte sólido, o balanço sedimentar que está presente em cada perfil de controlo e a sucessiva evolução da linha de costa, fazendo-se referência à taxa de avanço ou recuo da linha de costa em cada caso.

6.1 Alimentações contínuas

De acordo com as simulações efectuadas no programa de modelação, foi possível obter vários resultados que ajudam a perceber de que forma irá actuar cada um dos sistemas adoptados neste estudo.

O primeiro factor analisado é a relação que o volume de sedimentos a colocar em cada uma das localizações tem com o caudal sólido em transporte. A Figura 31 demonstra de que forma o caudal sólido em transporte se relaciona com os diversos volumes de sedimentos colocados como alimentação contínua, para passados 10 e 50 anos, nos diferentes perfis de controlo.

Numa análise muito geral, verifica-se que a média do transporte sólido é mais elevada ao fim de 10 anos do que passados 50 anos. Este fenómeno justifica-se porque ao longo do tempo, a linha de costa evolui para o equilíbrio, alterando a capacidade de transporte sedimentar, que acaba por diminuir. Este processo corresponde a uma rotação da linha de costa e redução da componente da onda com a influência no transporte sólido longitudinal, de acordo com a Figura 32.

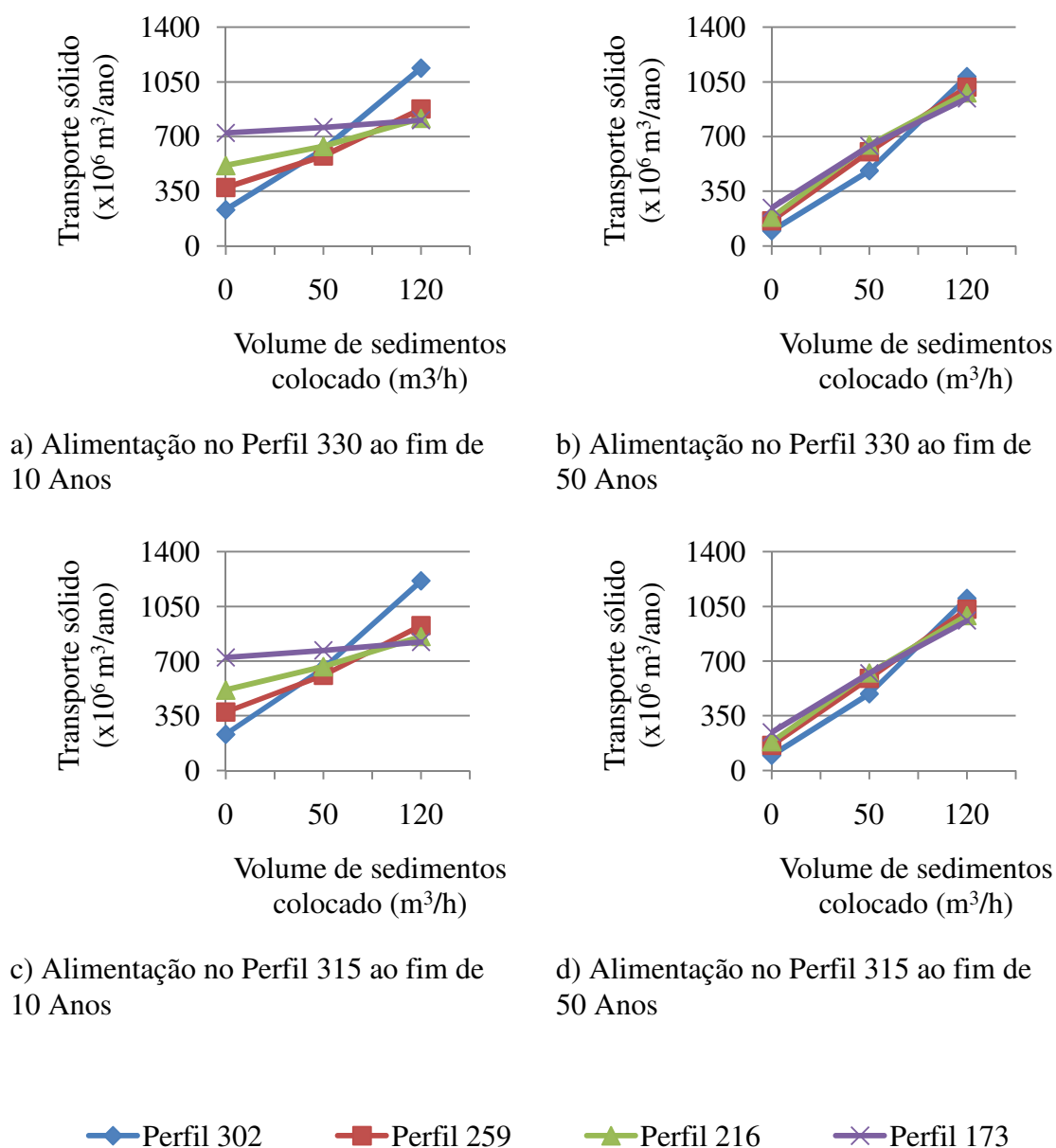


Figura 31 – Caudal sólido em transporte nos perfis de controlo

A Figura 31, revela outro aspecto interessante. Trata-se do facto do transporte sedimentar no primeiro perfil de controlo (Perfil 302) ser superior quando o depósito se efectua no Perfil 315, pois esta localização encontra-se a barlamar deste perfil de controlo. Este facto é mais evidente ao fim de 10 anos do que ao fim de 50 anos.

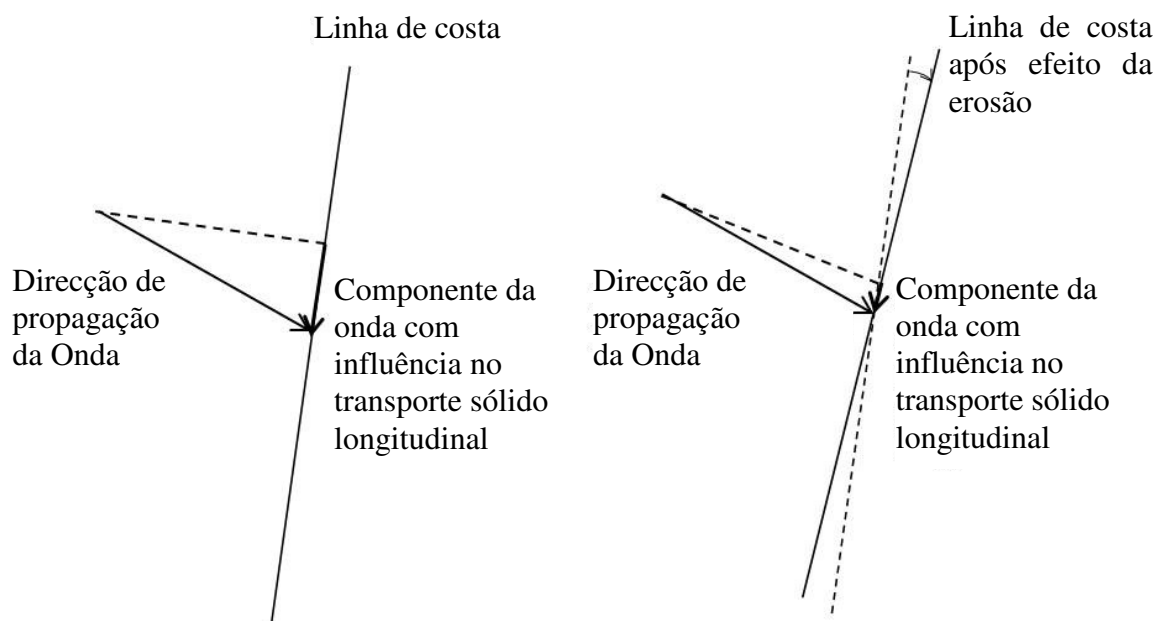
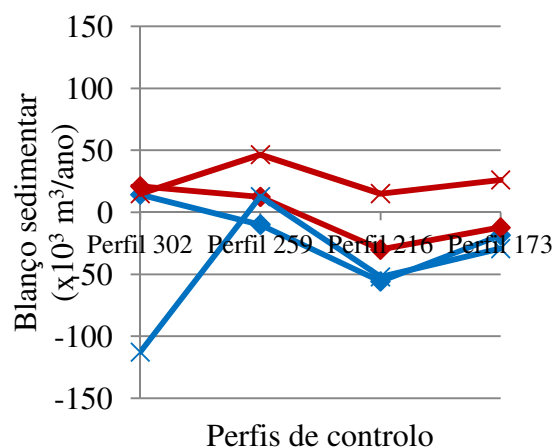


Figura 32 - Esquema da relação entre a linha de costa e a direcção de propagação da onda no transporte sólido longitudinal

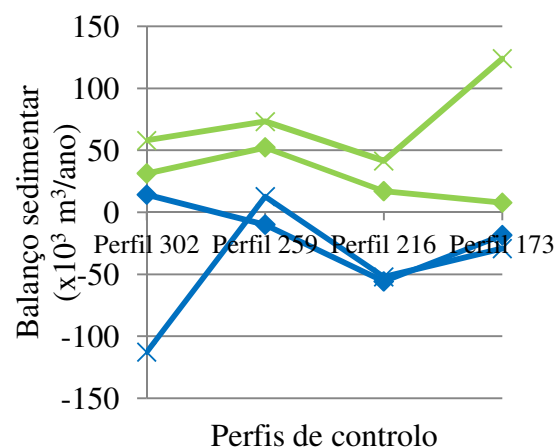
Quando se realiza uma alimentação superior ($120 \text{ m}^3/\text{h}$), a linha de costa é mantida mais próxima da situação actual e consequentemente a capacidade de transporte sólido ao longo dos diversos perfis de controlo é significativamente superior, pois não sucede a rotação e erosão esquematizada na Figura 32.

Outro aspecto que é igualmente importante analisar, é o balanço sedimentar. Na Figura 33, a situação de não intervenção (alimentação de $0 \text{ m}^3/\text{h}$) serve de referência. Na análise é claro o facto de que, recorrendo a volumes maiores de sedimentos colocados se alcançam balanços sedimentares mais positivos.

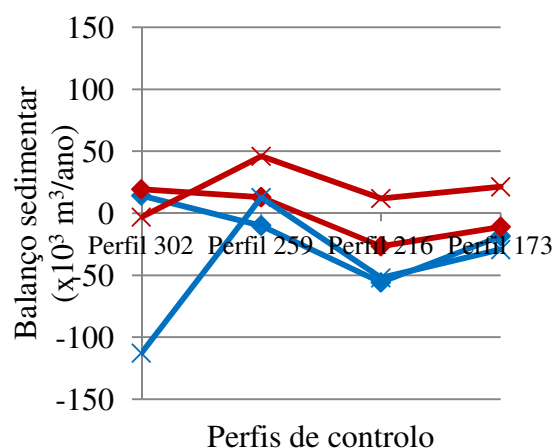
Outro acontecimento que está muito patente na Figura 33 é a diferença entre não se intervir (representado pelas linhas correspondentes ao volume de $0 \text{ m}^3/\text{h}$ de sedimento colocado) e intervir (representado pelas linhas correspondentes aos volumes de $50 \text{ m}^3/\text{h}$ e $120 \text{ m}^3/\text{h}$ de sedimentos colocados). Retira-se dessa análise que é vantajoso intervir e que as duas formas de intervenção simuladas vão melhorar a situação presente, com balanços sedimentares positivos.



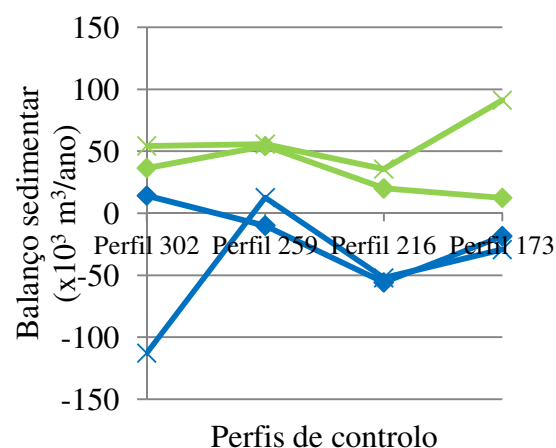
a) Alimentação de 50 m³/h no Perfil 330



b) Alimentação de 120 m³/h no Perfil 330



c) Alimentação de 50 m³/h no Perfil 315



d) Alimentação de 120 m³/h no Perfil 315

Volume de sedimentos colocado (m³/h):

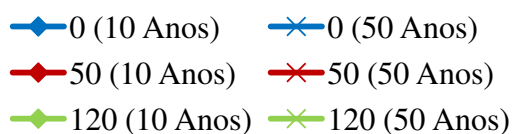
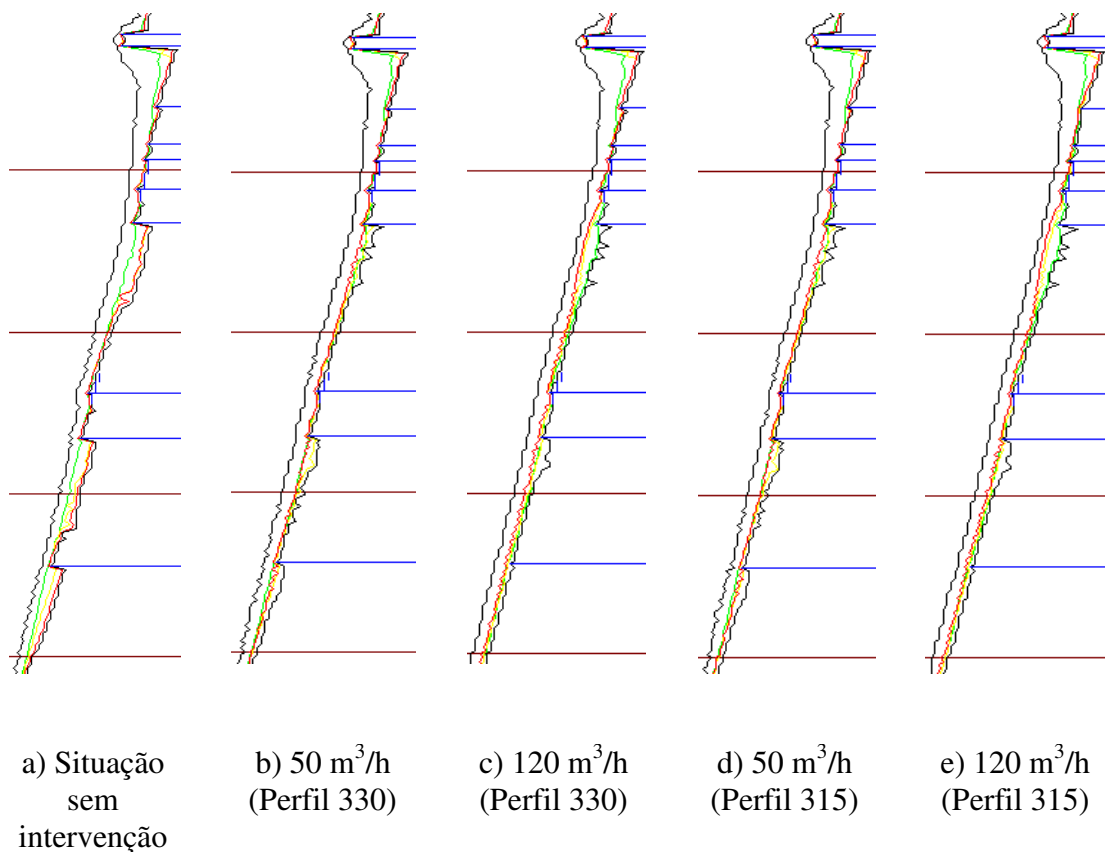


Figura 33 - Comparação do balanço sedimentar em cada um dos perfis

Em relação à localização dos vários casos de alimentação, para um volume de alimentação de 50 m³/h, os balanços sedimentares nas duas situações simuladas são praticamente iguais. Para o caudal de alimentação de 120 m³/h, existem diferenças acentuadas entre as

localizações nos Perfis 330 e 315, principalmente numa análise para passados 50 anos. Esta diferença é mais efectiva no perfil de controlo mais a sotamar, em que a diferença ronda os 30000 m³/ano, de sedimentos, cerca de 36% a mais do que o balanço sedimentar do mesmo perfil, quando a alimentação é realizada no perfil de depósito 315. Este comportamento pode-se justificar devido ao Perfil 330 se localizar a Norte do perfil de depósito 315. Tal característica permite que haja um maior volume de sedimentos em movimentação, que só a partir dessa localização começa a afectar a evolução da linha de costa e alterar o balanço sedimentar de forma mais significativa.



Legenda			
Perfil activo	—	0 Anos	—
Obras costeiras	—	10 Anos	—
Perfis de controlo	—	50 Anos	—

Figura 34 - Evolução da linha de costa para diferentes situações de alimentação contínua

Também foi analisada a evolução da linha de costa de uma forma gráfica (Figura 34), comparando as variações na posição de cada uma das linhas, após as diversas intervenções testadas.

Esta representação visual da evolução da linha de costa nos diferentes casos de alimentação serve para demonstrar alguns fenómenos curiosos. Na Figura 34, a influência dos esporões, quebramares e obras longitudinais aderentes sobre a configuração da linha de costa é evidente. No entanto, um aspecto que mais uma vez se destaca é a diferença entre a situação de não se intervir e a situação de intervenção. É visível o comportamento das diferentes linhas de costa, consoante os casos de alimentação, sendo perceptível, em algumas zonas, um avanço do território terrestre para a alimentação de um volume de $120 \text{ m}^3/\text{h}$.

Nos gráficos da Figura 35, procede-se a uma avaliação das taxas anuais de erosão ou acreção das sucessivas linhas de costa para 10 e 50 anos, em cada um dos perfis de controlo, para os diferentes casos de alimentação.

Nos gráficos, os valores negativos representam o recuo da linha de costa e os valores positivos representam o avanço da linha de costa.

Verifica-se, através da comparação das Figuras 34 e 35, que sempre que existe um balanço positivo ou negativo, essa tendência é acompanhada por um avanço ou recuo da linha de costa, respectivamente.

De uma forma geral, os gráficos mostram um aspecto já referido, a diferença significativa entre as linhas de costa para os volumes de alimentação de 50 e $120 \text{ m}^3/\text{h}$. Nos gráficos correspondentes a um volume de alimentação de $120 \text{ m}^3/\text{h}$ verifica-se um acréscimo de sedimentos em todos os perfis de controlo o que significa um avanço em termos de linha de costa em relação à situação inicial de grande erosão costeira. Esta situação, vai ao encontro do balanço sedimentar positivo registado nos perfis.

Comparando as duas localizações onde são efectuadas as alimentações de areias, para o volume de $120 \text{ m}^3/\text{h}$, verifica-se que para o Perfil 330 ocorre um equilíbrio da linha de costa para o primeiro perfil de controlo (Perfil 302), o que não sucede no caso de se proceder à alimentação no Perfil 315, que regista um aumento na diferença entre a linha de

costa inicial e após a intervenção. No entanto, nos restantes perfis de controlo ocorre um maior ganho em termos de posição da linha de costa em relação ao estado inicial, no caso de se efectuar a alimentação contínua no Perfil 330, com um caudal de alimentação de $120 \text{ m}^3/\text{h}$ de sedimentos.

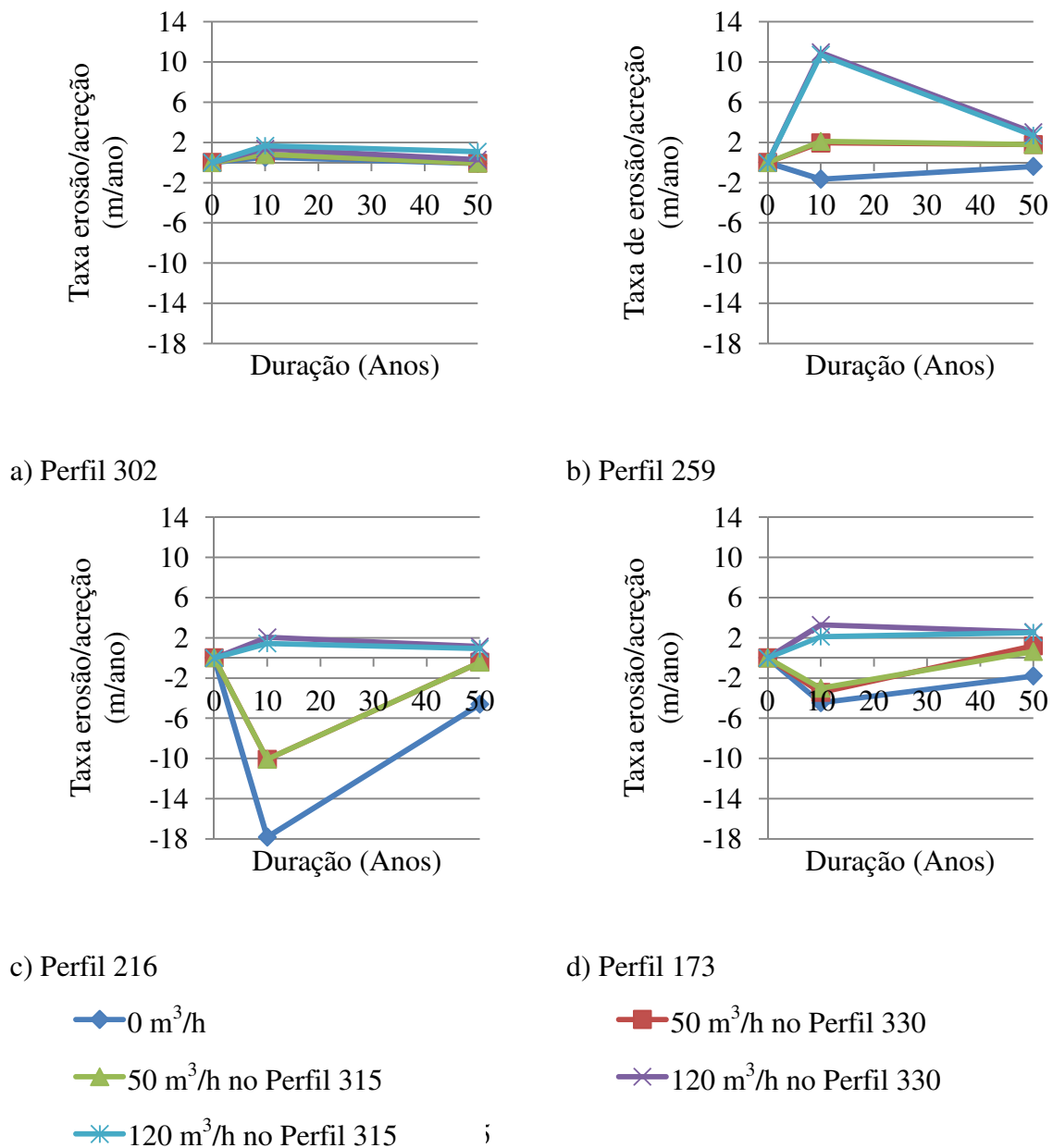


Figura 35 - Comparação das taxas de avanço ou recuo da linha de costa nos perfis de controlo

6.2 Alimentações localizadas

Para as situações de alimentações localizadas que foram modeladas no programa, procedeu-se a uma análise semelhante à anterior. Neste caso as alimentações testadas são caracterizadas pelo facto do local de recolha e de deposição de sedimentos ser uma área, em vez de um perfil específico como foi simulado no caso das alimentações contínuas.

Para análise dos diferentes casos de alimentação artificial de areias (Tabela 5), voltou-se a dar ênfase a alguns factores que ajudam a perceber de que forma contribuem para configuração da linha de costa da Barra de Aveiro.

Tabela 5 - Descrição dos testes efectuados

Teste 1	Alimentação na área 300x500 m ² , ao longo da praia
Teste 2	Alimentação na área 300x500 m ² , transversal à praia
Teste 3	Alimentação na área 100x1500 m ² , ao longo da praia
Teste 4	Alimentação na área 300x500 m ² , ao longo da praia e a meio do perfil activo
Teste 5	Alimentação na área 600x1000 m ² , ao longo da praia
Teste 6	Alimentação na área 300x500 m ² , ao longo da praia através de 8 intervenções
Teste 7	Alimentação na área 300x500 m ² , ao longo da praia e durante 6 meses
Teste 8	Alimentação na área 300x500 m ² , ao longo da praia no Perfil 315

A fim de permitir a comparação de valores entre os diversos casos de alimentação artificial de areias, estabeleceu-se um caso base para referência, que simula a situação em que não há qualquer tipo de intervenção. Assim, é possível perceber de que forma determinada intervenção irá influenciar a linha de costa actual.

Numa análise inicial, é importante perceber de que forma os diferentes tipos de alimentação artificial de areias influenciam os volumes de transporte sólido. Esta análise é importante, pois é através da capacidade de transporte sólido que a linha de costa se altera.

A Figura 36 mostra diferentes gráficos correspondentes a cada um dos casos de alimentação, em que se relaciona o caudal sólido em transporte (m^3/ano) ao longo dos vários perfis de controlo, com as várias formas de alimentação, que variam em área e tempo de operação.

Começando por analisar os resultados em termos das diferentes áreas de alimentação, os maiores caudais de transporte sólido verificam-se para o caso em que a área de deposição de sedimentos é $100 \times 1500 \text{ m}^2$. Isto justifica-se porque este caso de alimentação possui uma extensão superior aos outros casos e esta situação permite que haja um maior número de sedimentos em movimento, que se traduz num elevado transporte sólido.

Com uma análise rápida dos gráficos apresentados na Figura 36, é saliente que os resultados de cada uma das alimentações simuladas são semelhantes, não variando muito os valores do volume de transporte sólido, com a exceção de dois casos: o Teste 6, para uma alimentação em que a operação é dividida por oito vezes ao longo dos 50 anos (Figura 36f) e para o caso em que a área de alimentação se localiza no Perfil 315 (Figura 36h).

Começando por analisar o gráfico da alimentação correspondente à Figura 36f, em que a operação é dividida por oito vezes ao longo dos 50 anos, é o caso em que se verifica o maior volume de transporte sólido ao fim de 50 anos. Tendo um crescimento mais acentuado entre os Perfis 302 e 259, o volume de transporte sólido tende a ser constante ao longo dos restantes perfis. Contudo, o valor do transporte sedimentar, correspondente às situações inicial e após intervenção, para os primeiros 10 anos é muito semelhante ao longo dos perfis de controlo. A razão para tal acontecer deve-se ao menor volume de sedimentos colocados inicialmente, em relação aos outros testes, e a este volume não ser significativo para alterar o transporte sólido de uma forma mais evidente. Ao longo dos vários perfis de controlo é notório o aumento do volume de transporte sólido, mantendo uma escala crescente ao longo dos vários perfis de controlo. Este aspecto mostra que esta alimentação faz com que o transporte sólido vá aumentando conforme se desenrola para Sul.

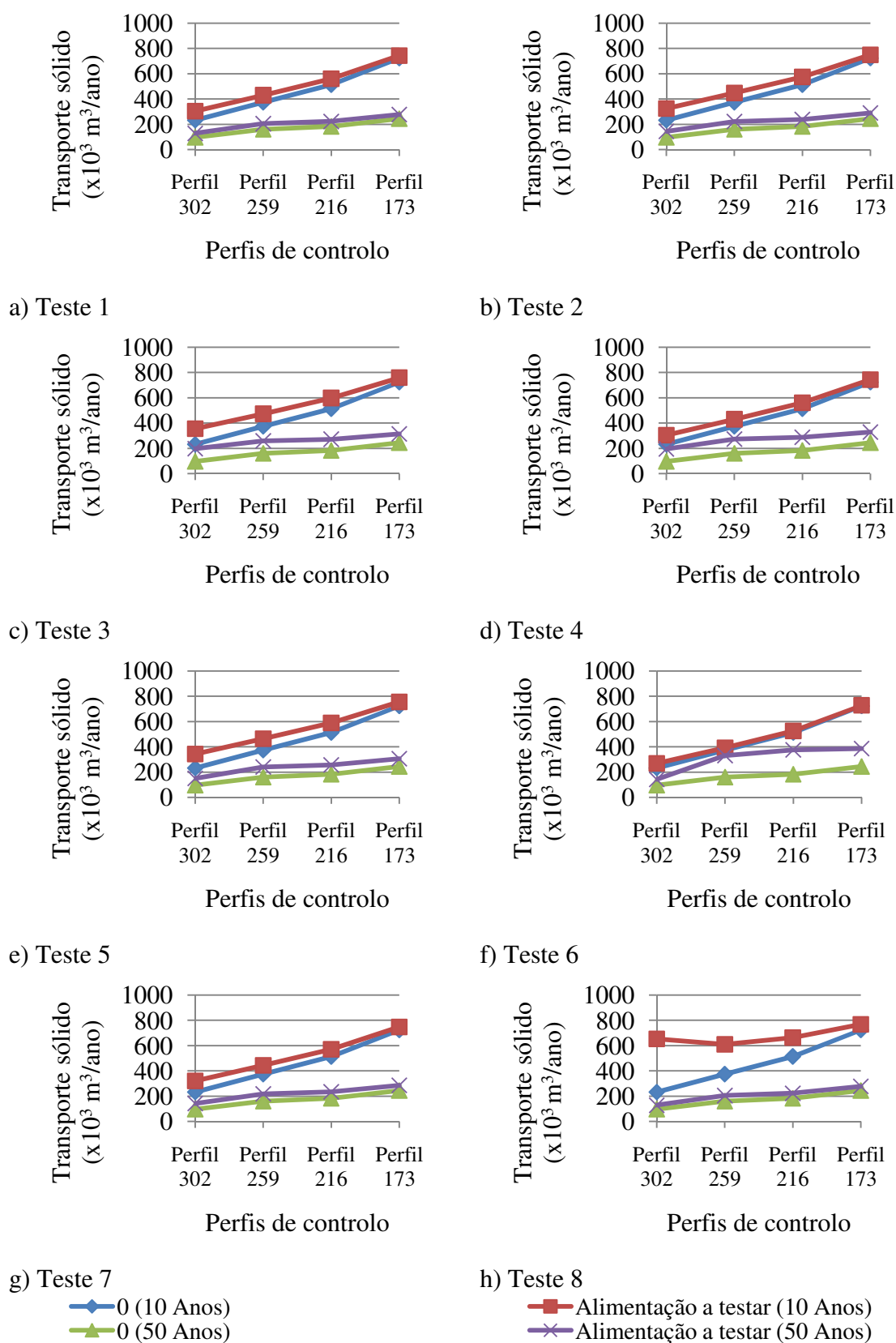


Figura 36 - Comparação do transporte sólido nos diversos casos de alimentação

A alimentação localizada no perfil 315, correspondente à Figura 36h, mostra que no primeiro perfil de controlo, passados 10 anos, há um grande número de sedimentos a ser movimentado, em relação aos outros casos de alimentação. Imediatamente no perfil a sotamar ocorre uma diminuição do transporte sólido mantendo uma uniformidade crescente ao longo dos restantes perfis. Isto acontece, uma vez mais, por a zona de acréscimo de sedimentos se encontrar mais próxima do primeiro perfil de controlo do que nos restantes casos, em que a localização da zona de acréscimo de sedimentos se situa mais a Norte desta e por isso, mais afastada da zona da primeira leitura dos valores do transporte sólido.

Tendo em conta estes resultados, facilmente se percebe que a solução que mais contribuirá para um maior transporte sólido é o caso em que se efectuam oito acréscimos de areias ao longo dos 50 anos. Interessa agora saber como contribui o transporte sólido para a reposição de sedimentos ao longo da costa.

A Figura 37 apresenta vários gráficos, referentes a cada uma das alimentações testadas, em que se relaciona o balanço sedimentar registado ao longo dos perfis de controlo.

Em alguns casos é possível verificar-se que passados 10 anos, o balanço sedimentar é semelhante para a situação de não intervenção e a de alimentação artificial de areias. Significa isto, que apesar dos volumes de transporte sólido aumentarem com as alimentações artificiais, os sedimentos que realmente ficam retidos nos perfis são os mesmos. Este comportamento acaba por se alterar significativamente passados 50 anos no Teste 6. Através desta análise prevê-se assim que esta intervenção não terá um efeito imediato, mas sim ao longo do tempo, nos três perfis de controlo localizados mais a Sul.

Para o Teste 1, correspondente à Figura 37a, verifica-se uma grande variação de valores do balanço sedimentar passados 10 e 50 anos no perfil de controlo a Norte. Passados 10 anos, o balanço sedimentar é positivo, ou seja, existem sedimentos a depositar-se neste perfil de controlo. Para 50 anos, o balanço sedimentar nesta zona baixa acentuadamente e passa a ser negativo, o que se traduz na erosão desta zona.

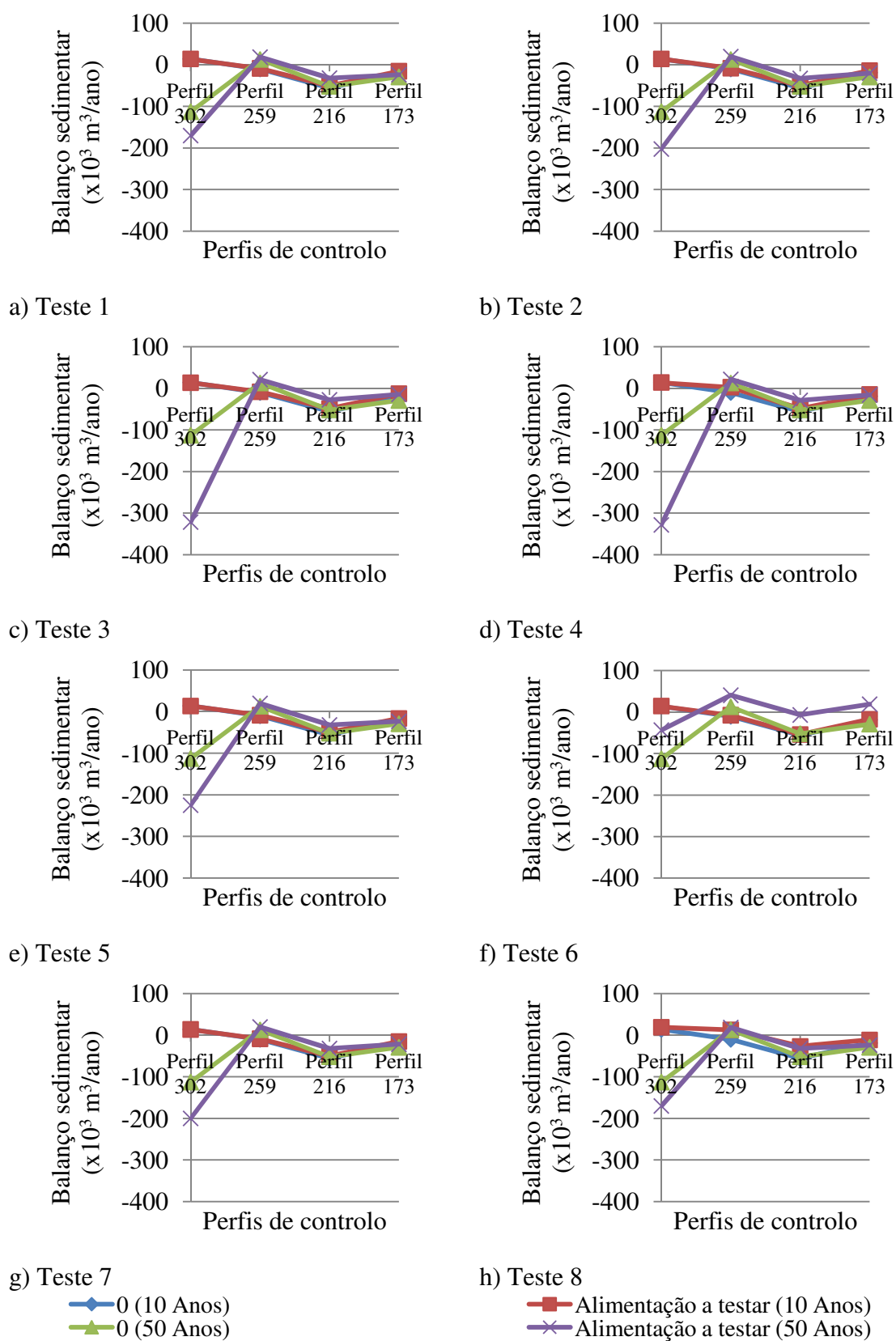


Figura 37 - Comparação do balanço sedimentar nos diversos casos de alimentação

Em relação ao resto dos perfis, o balanço sedimentar no Teste 1 mantém-se mais ou menos o mesmo, sendo no Perfil 259 um balanço sedimentar positivo e nos restantes dois negativo. Quer isto dizer que esta alimentação melhorou um pouco a situação em termos de equilíbrio da costa mas, apesar de ao fim de 50 anos, o Perfil 302 estar numa situação pior do que inicialmente.

Nas restantes situações este comportamento é em todo semelhante, sendo a situação do Teste 4, em que os sedimentos são colocados a meio do perfil activo (Figura 37d), aquela que regista o maior balanço sedimentar negativo, registado nos perfis de controlo de barlamar. Este acontecimento sucede por se colocar os sedimentos numa zona em que existe grande movimentação de sedimentos, o que faz com que os sedimentos colocados sejam rapidamente transportados, não havendo por isso uma alimentação mais frequente que levasse a resultados mais positivos.

Importa ainda salientar outros dois casos que se destacam da análise dos gráficos apresentados na Figura 37. A situação em que a alimentação é dividida por oito operações de alimentação artificial de areias ao longo dos 50 anos (Figura 37f), apresenta os valores mais positivos de balanço sedimentar. Neste teste, em relação ao comportamento sedimentar ao longo da linha de costa, apenas no perfil de controlo 302 se regista uma diminuição do volume de sedimentos, na análise aos 10 e 50 anos. No entanto, nos restantes perfis o balanço é positivo para ambos os períodos de análise, registando-se um acumular de sedimentos nos perfis, ao longo do tempo. Esta solução traduz-se num acréscimo de sedimentos nos perfis, com o balanço positivo.

O outro caso que é importante destacar é o Teste 8, correspondente à alimentação efectuada a Sul do Perfil 315 (Figura 37h), com uma área de 300x500 m². Comparando este teste com o teste apresentado na Figura 37a, verifica-se que no perfil de controlo a barlamar (Perfil 302) os valores são semelhantes, mas nos restantes perfis o balanço sedimentar é mais positivo ao fim de 10 anos, no caso da alimentação mais a Sul. No entanto, passados 50 anos o balanço mantém-se o mesmo que o registado passados 10 anos. Conclui-se com isto, que os dois casos diferem no efeito mais imediato (passados 10 anos), ocorrendo um balanço sedimentar superior no caso da alimentação ser feita no Perfil 315, mas passados 50 anos o comportamento acaba por ser exactamente o mesmo, em ambos os casos.

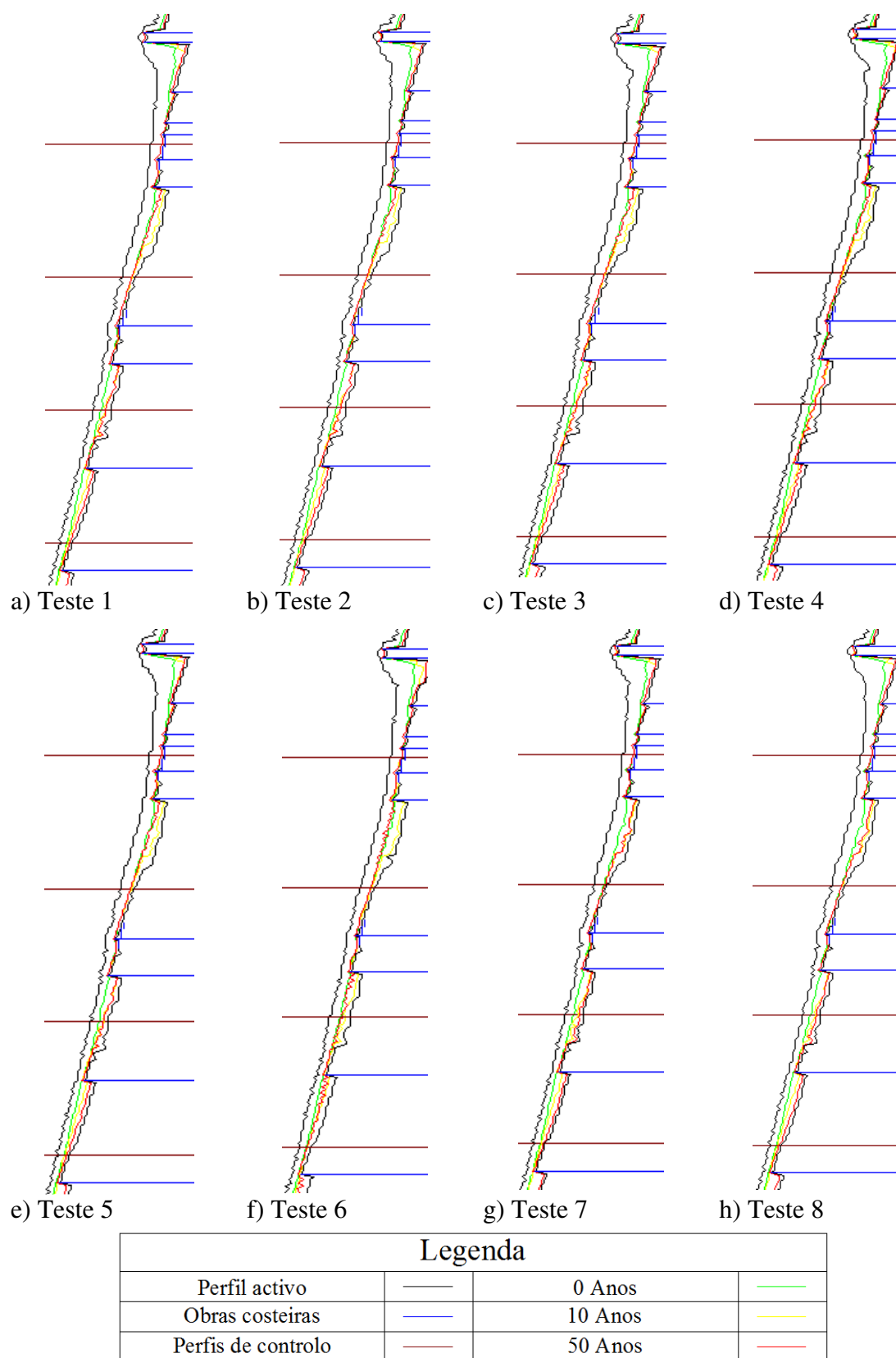


Figura 38 - Evolução da linha de costa para as alimentações artificiais de areias

A figura anteriormente apresentada (Figura 38) mostra uma comparação da evolução das linhas de costa obtidas dos testes realizados no programa de modelação, para as diferentes situações de alimentação de areias.

Relativamente à diferente configuração das linhas de costa, verifica-se que o caso em que alimentação é feita através de oito períodos de deposição de sedimentos ao longo de 50 anos (Figura 38f), é aquele que ao fim de 50 anos possui uma linha de costa mais uniforme e avançando em relação à linha de costa inicial, representada a verde.

Através da comparação da evolução das várias linhas de costa verifica-se que, os casos em que a linha de costa sofre um maior recuo ao fim de 50 anos, são os casos em que alimentação demora 6 meses (Figura 38g), em vez de 1 mês como nos outros testes, e a alimentação é realizada no Perfil 315, mais a Sul, com uma área de 300x500 m². Este aspecto está bem evidente na zona entre os dois perfis de controlo mais a Norte, representados a vermelho escuro, em que a linha dos 50 anos encontra-se quase coincidente com a fronteira Este do perfil activo, representada a preto.

Um importante aspecto a referir é o volume de sedimentos envolvido em cada uma das diferentes soluções. Na Tabela 6, é possível comparar os diferentes volumes de sedimentos a entrar na fronteira Norte da área de modelação, os volumes de sedimentos a saírem na fronteira Sul da área modelada e o volume transposto ao longo dos 50 anos, que é o mesmo para todos os casos de alimentação localizada estudados. Como já referido no capítulo anterior, onde se especifica as condições de modelação de cada um dos vários testes, estes volumes de sedimentos que entram e saem nas fronteiras resultam da média dos volumes de sedimentos em transporte nas três secções posteriores e anteriores, respectivamente. Da análise desta tabela facilmente se percebe que o teste em que existe mais sedimentos retidos ao longo da costa modelada é o Teste 6, pois possui o menor volume de sedimentos a sair na fronteira Sul.

Tabela 6 - Volumes de sedimentos envolvidos nas alimentações localizadas ao fim de 50 anos

	Volume de entrada na fronteira Norte (m ³)	Volume de saída na fronteira Sul (m ³)	Volume transposto (m ³)
Teste 1	42752	37073292	1500000
Teste 2	42752	37185820	1500000
Teste 3	42752	37335444	1500000
Teste 4	42752	37360540	1500000
Teste 5	42752	37326256	1500000
Teste 6	42752	37040012	1500000
Teste 7	42752	37155604	1500000
Teste 8	42752	37150640	1500000

De acordo com os desenhos da evolução da linha de costa para os vários casos de alimentação artificial testadas, elaboraram-se os gráficos apresentados na Figura 39. Os gráficos referentes à evolução da linha de costa de cada caso de alimentação permitem uma comparação directa com os desenhos apresentados na figura anterior.

O caso da alimentação artificial de areias representado pela Figura 39f é aquele em que a linha de costa avança mais, com diferenças na ordem dos 1 m/ano entre a situação inicial e a situação ao fim de 50 anos, no perfil de controlo de sotamar (Perfil 173). Verifica-se também, que nos primeiros 10 anos ocorre um recuo da linha de costa nos três perfis de controlo mais a Sul (Perfis 259, 261 e 173). Isto porque a alimentação é dividida em oito operações ao longo do tempo, o que leva a que as primeiras alimentações não tenham um

grande efeito nos perfis em causa. No entanto, nos anos seguintes, estes perfis começam a recuperar, ocorrendo um avanço da linha de costa em relação à situação inicial.

A alimentação de uma área de $100 \times 1500 \text{ m}^2$, correspondente ao Teste 3, é aquela que em comparação com os outros casos, à excepção da alimentação dividida em oito operações, possui menores recuos da linha de costa nos vários perfis de controlo. Na comparação da situação da Figura 39a, com a da Figura 39f, em que a área de alimentação é a mesma ($300 \times 500 \text{ m}^2$), apenas diferem na forma como foram colocados os sedimentos, ao longo do tempo, verifica-se que a diferença na colocação dos sedimentos faz com que o segundo caso se assemelhe a uma alimentação contínua, em que praticamente ao longo de todo o período de simulação ocorrem operações de alimentação de sedimentos. Com esta alimentação mais contínua, há uma deposição mais uniforme dos sedimentos ao longo da costa.

Nos restantes casos o comportamento das linhas de costa é mais ou menos semelhante, salientando-se apenas os últimos dois casos (Figura 39g e Figura 39h), em que ocorrem os recuos de linha de costa mais elevados, nomeadamente para o Perfil 216.

É importante salientar outro aspecto visível nos vários gráficos apresentados na Figura 39, que é o facto de ocorrer sempre erosão no Perfil 216. A razão para que tal aconteça deve-se por este perfil de controlo se localizar numa zona entre dois esporões, nomeadamente, entre o esporão Sul da Vagueira e o esporão de Poço da Cruz. Esta zona, onde o Perfil 216 se encontra, é caracterizada por ser um local em que o perfil activo mais recua em direcção à costa que contribui para o fenómeno de erosão neste perfil. Quer isto dizer que esta zona se encontra mais susceptível à acção da erosiva do mar, que se traduz na erosão deste troço de costa.

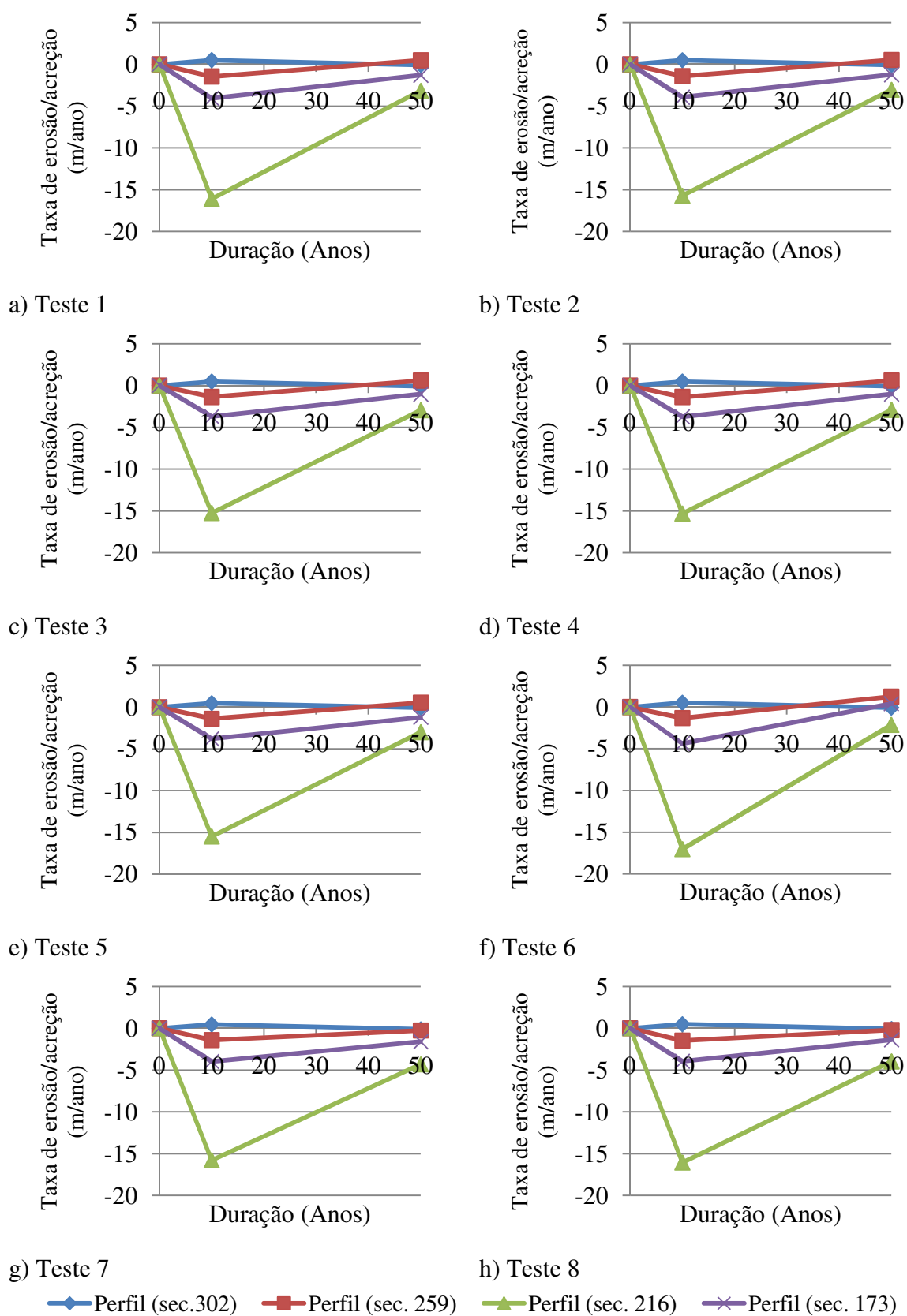


Figura 39 - Comparação da evolução da linha de costa nas alimentações artificiais

6.3 Análise da melhor opção

As várias alimentações simuladas, analisadas e discutidas apresentam diferentes resultados. Elas dividem-se em dois tipos de alimentação possíveis, alimentações contínuas e alimentações localizadas. No caso das alimentações contínuas, os sedimentos são extraídos e depositados de uma forma constante ao longo do tempo, e o volume da alimentação é repartido de uma forma mais uniforme. Nas alimentações localizadas, o modo de extracção e deposição do sedimento é diferente. Nestes casos, a extracção e deposição dos sedimentos é feita em áreas específicas, que se fizeram variar em termos de locais de alimentação. Também se variaram os tempos necessários para a operação de alimentação ou a forma como são distribuídos os sedimentos no tempo.

Após análise de todos os casos ensaiados em cada um dos dois tipos de alimentação artificial de areias é fundamental analisar os dois tipos de alimentação. Recorreu-se a uma análise mais aprofundada das soluções que aparentam ser mais eficazes.

Optou-se por comparar dois casos, um de alimentação contínua e outro de alimentação distribuída por uma área. Nesta análise procedeu-se a uma adaptação da alimentação distribuída por uma área, nomeadamente no que diz respeito aos volumes dos sedimentos colocados ao longo das várias intervenções. Simulou-se neste caso nove operações de extracção/deposição dos sedimentos, ao longo dos 50 anos, e espaçadas entre si de 6 em 6 anos. Os volumes extracção e deposição envolvidos em cada uma das nove operações correspondem a 1.5 milhões de metros cúbicos de sedimentos. Este valor foi escolhido de forma a permitir uma melhor comparação com uma solução de alimentação contínua e que ao mesmo tempo corresponde-se a um volume envolvido em dragagens comuns.

Considerou-se que os aspectos mais importantes para esta análise seriam a evolução da linha de costa e a forma como cada um dos casos a influencia.

A figura a seguir apresentada (Figura 40) mostra de forma visual a evolução da linha de costa em cada um dos dois casos seleccionados. Na figura correspondente à situação de alimentação contínua (Figura 40a), pode-se observar que o desenvolvimento da linha de costa é feito de uma forma constante e uniforme. Verifica-se também um equilíbrio da linha de costa na zona imediatamente a sotamar do quebramar Sul da Barra de Aveiro.

É também visível, para as zonas mais a Sul, a evolução da linha de costa no sentido Este-Oeste, com um significativo avanço da linha de costa ao longo dos anos. Ao fim dos 50 anos de intervenção, a linha da costa da zona de Aveiro torna-se mais uniforme e constante ao longo do seu desenvolvimento o que se traduz num equilíbrio da costa.

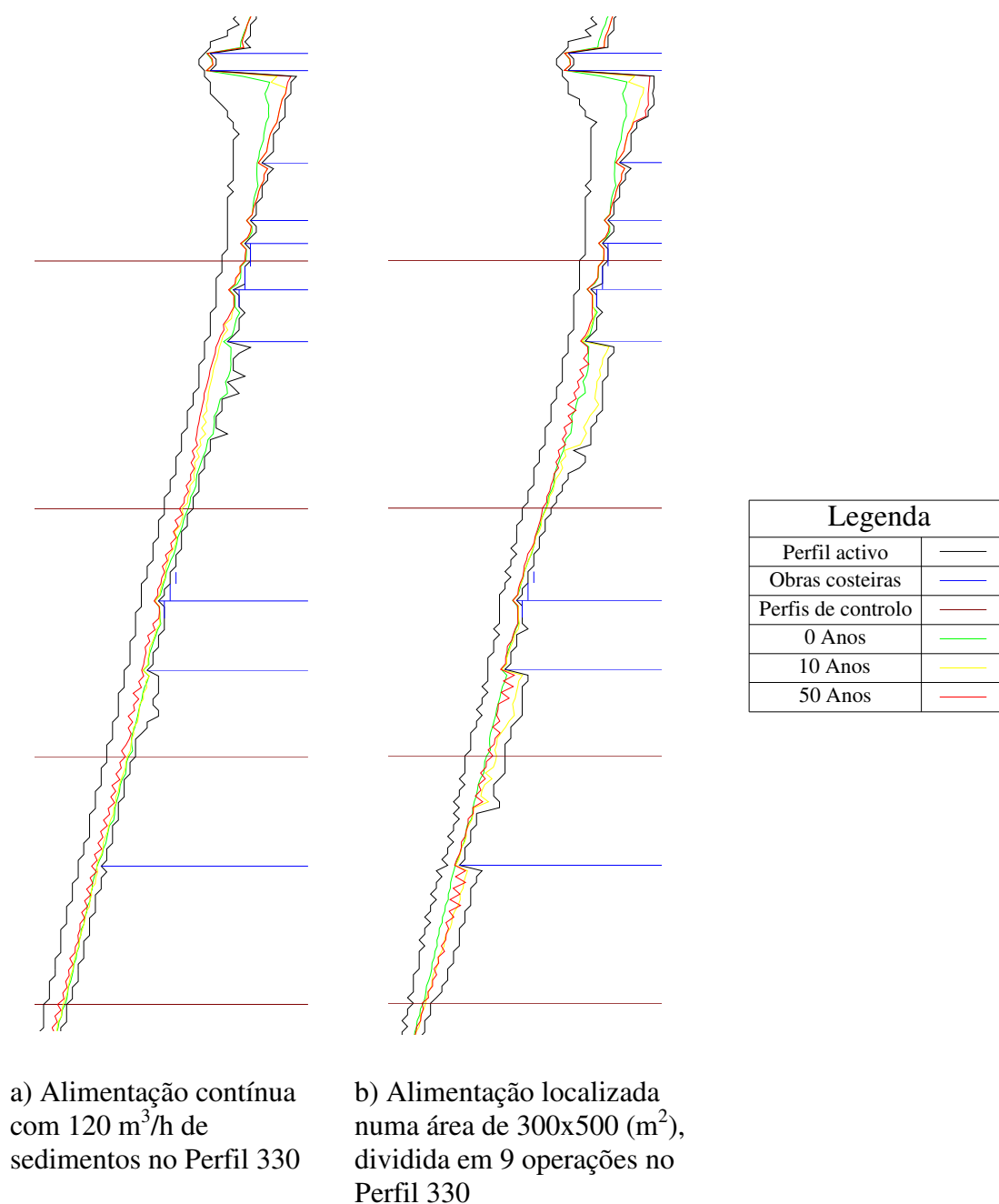


Figura 40 - Evolução da linha de costa para os dois tipos de alimentação

Em relação à situação em que alimentação artificial de areias é feita através de uma área e ao longo de nove operações de deposição de sedimentos, espaçadas de 6 em 6 anos, também se verificam resultados positivos. Constata-se também, relativamente à evolução da linha de costa, que apesar dos resultados obtidos no programa não serem tão satisfatórios como no caso de uma alimentação contínua, esta solução apresenta-se como uma solução eficaz no combate à erosão costeira.

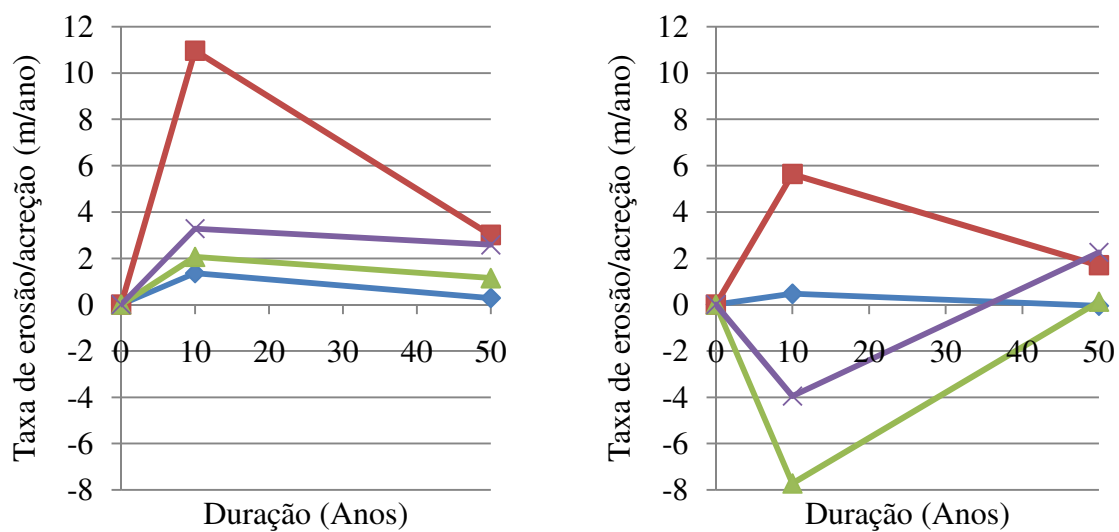
Para uma análise mais correcta e completa é importante referir alguns dos volumes de sedimentos envolvidos em cada uma das soluções (Tabela 7).

Tabela 7 - Volumes de sedimentos ao fim de 50 anos nos dois tipos de alimentação

Tipo de Alimentação	Volume de entrada na fronteira Norte (m ³)	Volume de saída na fronteira Sul (m ³)	Volume transposto (m ³)
Contínua	52442164	44974040	52560000
Localizada	42752	44432948	13500000

Em relação ao volume de sedimentos a sair na fronteira Sul, é menor na alimentação localizada de sedimentos. No entanto, não significa que se irão depositar mais sedimentos ao longo da costa com o recurso a esta solução pois o volume de sedimentos transposto na Barra de Aveiro é maior no caso de ser uma alimentação contínua. Quer isto dizer que neste caso (recorrendo a uma alimentação contínua) irá haver uma maior deposição de sedimentos ao longo da costa do que no caso de se recorrer a uma solução de alimentação localizada.

Na alimentação localizada o volume transposto é bastante inferior em relação ao volume que está a sair na fronteira Sul. Significa isto que ocorrem processos de erosão ao longo da costa em estudo, enquanto que, de uma forma geral tal não acontece numa alimentação contínua



a) Alimentação contínua com 120 m³/h de sedimento no Perfil 330

b) Alimentação localizada numa área de 300x500 (m²), dividida em 8 operações no Perfil 330

—●— Perfil 302 —■— Perfil 259 —▲— Perfil 216 —×— Perfil 173

Figura 41 – Taxa de erosão e acreção nos dois tipos de alimentação

Na Figura 41, é possível analisar as taxas de erosão e acreção de cada uma das diferentes soluções de alimentação artificial de areias. Através destes gráficos é possível visualizar de que forma as taxas de erosão e acreção variam ao longo dos anos, consoante cada um dos perfis de controlo.

Da análise destes dois gráficos, verifica-se que na solução de alimentação contínua e com um caudal de sedimentos de 120 m³/h, ocorrem apenas situações de acreção. Significa isto, que recorrendo a esta solução irá haver uma acreção de sedimentos ao longo dos vários perfis de controlo, não ocorrendo por isso erosão. Também é possível verificar-se que ao longo dos vários perfis a taxa de acreção de sedimentos vai aumentando, de uma forma mais intensa nos primeiros 10 anos, sendo o Perfil 259 o que regista maiores taxas de avanço da linha de costa, pois é o perfil imediatamente a sotamar da zona de deposição.

No Perfil 302, correspondente ao perfil mais a Norte dos quatro perfis adoptados para controlo, verifica-se que nos primeiros 10 anos de intervenção há um aumento na taxa de acreção de sedimentos, estabilizando e mantendo-se constante nos restantes anos.

Em relação à solução de alimentação artificial de areias por área, recorrendo a nove intervenções ao longo do tempo, as taxas de erosão e acreção variam, em relação à outra solução apresentada, existindo algumas situações de erosão.

Nos primeiros 10 anos, o gráfico da Figura 41b apresenta taxas de acreção nos dois perfis de controlo mais a Norte (Perfis 302 e 259) e taxas de erosão nos restantes perfis de controlo, localizados a Sul. Esta situação sucede por se tratar de uma alimentação localizada, em que a deposição de sedimentos é feita por períodos de tempo, com menores volumes em cada alimentação. Assim, a influência da alimentação no período inicial não tem capacidade para actuar em zonas mais distanciadas, nomeadamente nos Perfis 216 e 173. Nos restantes anos da simulação, as taxas de acreção no Perfil 302 diminuem ligeiramente, enquanto nos restantes perfis de controlo, passa haver avanço da linha da costa. No Perfil 216, a taxa de erosão ao fim da intervenção é nula havendo até uma ligeira acreção de sedimentos. No caso do Perfil 173, a taxa de erosão torna-se nula 35 anos após o início das operações de alimentação artificial de areias, havendo um acréscimo de sedimentos ao longo dos restantes anos.

Após análise dos diferentes resultados reunidos com as duas soluções de alimentação artificial de areias simuladas, considera-se que na solução de alimentação contínua obtêm-se resultados mais positivos e de uma forma mais rápida e eficaz. No entanto, a solução de alimentação por área, recorrendo a várias operações de alimentação de sedimentos, também se reflecte numa boa solução de intervenção, apesar dos resultados obtidos não serem tão positivos como na solução de alimentação contínua.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente capítulo referem-se as principais conclusões retiradas do estudo realizado sobre as soluções de alimentação artificial de areias para a Barra de Aveiro, a fim de reduzir os problemas de erosão costeira a Sul.

São também abordados alguns dos possíveis desenvolvimentos a realizar no futuro, de forma a completar este trabalho, permitindo contribuir para sustentar uma futura decisão.

7.1 Conclusões

A costa litoral de Portugal é muito extensa e possui um elevado risco de erosão costeira, causado especialmente pelo elevado défice sedimentar existente. É portanto, fundamental, de forma a combater esta escassez de sedimentos. Uma das hipóteses de mitigar este problema é recorrendo a sistemas de alimentação artificial de areias.

Existem várias formas de alimentação artificial, agrupadas por diferentes sistemas. Os sistemas podem ser fixos, semi-móveis e móveis, sendo normalmente os sistemas fixos aplicados a alimentações contínuas, os sistemas móveis aplicados a alimentações periódicas e os sistemas semi-móveis aplicados tanto a alimentações contínuas como periódicas.

A transposição artificial de sedimentos é uma potencial solução para os problemas de erosão de praias adjacentes a embocaduras e com inúmeros exemplos de aplicação espalhados pelo mundo, com sucesso. No entanto, este tipo de solução tem mais expressão no Norte da América e na Austrália.

Relativamente a Portugal, não existe a aplicação deste tipo de solução, destacando-se apenas soluções de alimentação artificial de areias, que recorrem sobretudo às habituais dragagens de sedimentos. Com o agravar do problema da erosão costeira, é necessário que haja em alternativa às soluções implementadas no passado para combater este problema. Assim sendo, a transposição artificial de areias apresenta-se como uma solução a ter em

conta em variados casos portugueses, a fim de melhorar a eficácia do combate à erosão costeira.

No caso da Barra de Aveiro a transposição artificial de areias apresenta-se como uma das opções mais correcta, pois existe um local de acumulação de sedimentos a Norte do quebramar Norte da entrada do porto de Aveiro. Adoptando a solução de uma transposição artificial de areias, é importante avaliar as diferentes formas de colocação dos sedimentos, na zona mais adequada, de forma a minorar o efeito da erosão na costa.

Recorrendo a simulações com o modelo numérico LTC para diferentes soluções de alimentação artificial de areias, foi possível estudar de que forma cada uma delas influencia a evolução da linha de costa. Esta abordagem pretendeu analisar prós e contras de cada uma das várias soluções possíveis para a Barra de Aveiro. O programa de modelação LTC, ao permitir quantificar os volumes sólidos em transporte, os balanços sedimentares em cada perfil transversal e a evolução da linha de costa, torna-se uma ferramenta útil para efectuar estudos do género.

Adoptaram-se neste trabalho duas formas diferentes de transposição artificial de areias, uma alimentação contínua com um ponto de extracção e um ponto de deposição de sedimentos, e outra alimentação periódica recorrendo a áreas de extracção e deposição dos sedimentos. Nos vários testes efectuados variaram-se diversos factores, como o volume de sedimentos necessário para alimentação, os tempos de duração de cada operação de alimentação, a frequência de operações de alimentação, localização da zona e áreas da deposição dos sedimentos.

Conclui-se com este trabalho que recorrendo a uma alimentação artificial contínua a operar com um volume de deposição de $120 \text{ m}^3/\text{h}$ de sedimentos ao longo de 50 anos, é possível combater a erosão costeira com resultados a curto prazo e devolver o equilíbrio da linha de costa. Por esse facto, esta solução aparenta ser a mais adequada para a Barra de Aveiro. Desta forma, o sistema de transposição artificial de areias proposto seria um sistema fixo, recorrendo a bombas de extracção e de deposição em que o transporte dos sedimentos seria efectuado por meio de tubagem colocada no solo, atravessando o canal de entrada no porto de Aveiro, sendo ela também fixa. Uma proposta semelhante já tinha sido apresentada em

por Pinheiro (2008). Esta proposta defendia o recurso a cinco bombas instaladas no quebramar norte, semi-móveis, de forma a permitir um maior raio de acção e maior produtividade. No entanto, segundo Pinheiro (2008), os sistemas fixos e contínuos de transposição artificial de areias são a solução economicamente mais cara.

Tentando reduzir o aspecto económico, apresenta-se um sistema de alimentação periódico e semi-móvel como alternativa a um sistema fixo. O sistema baseia-se no recurso a dragas ou bombas móveis para extracção dos sedimentos a Norte do quebramar Norte do porto de Aveiro. Relativamente ao transporte dos sedimentos extraídos, poderá recorrer-se a um sistema de tubagem instalado ao longo da costa ou através de barco, já que, o recurso ao transporte em camiões é inviável por não existir uma ponte que ligue S. Jacinto à Barra de Aveiro, alongando o percurso em cerca de 40 km. Para a colocação dos sedimentos extraídos a Norte, pode-se recorrer a qualquer um dos meios de deposição e distribuição de sedimentos referidos no Capítulo 2.

7.2 Desenvolvimentos futuros

As soluções propostas neste trabalho têm um carácter indicativo em termos dos tipos de alimentação artificial de areias mais eficazes para o caso da Barra de Aveiro, tendo em conta factores que influenciam a evolução da linha de costa.

No âmbito deste estudo, deveriam ser analisados outras soluções de alimentação artificial de areias, efectuando novos testes no modelo LTC, para climas de agitação variáveis, simulando o mesmo tipo de soluções adoptadas neste trabalho. Seria também interessante testar outras soluções de alimentação localizada, para outros tempos de operação da alimentação e aumentar o número de operações de alimentação ao longo do tempo de forma a ter períodos mais curtos entre as sucessivas operações de alimentação. Propõe-se ainda a simulação de soluções que têm vários pontos de deposição ao longo da costa de forma a concluir se este factor tem alguma influência na evolução da linha de costa, permitindo um melhor combate da erosão costeira.

De forma a complementar este trabalho, poder-se-ia ainda aprofundar o estudo das soluções propostas com base no estudo do LTC em termos técnicos e operacionais,

definindo o tipo de equipamento necessário e disponível no mercado para que o tipo de alimentação adoptado seja aplicado no local. Os custos associados a estas soluções propostas devem ser avaliados através de uma consulta de mercado para as situações concretas. Este estudo tem particular interesse a nível da viabilidade económica da solução a aplicar na Barra de Aveiro, permitindo verificar se esta é possível de sustentar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andrade, C., Freitas, M. (2002); Climate Change in Portugal – Scenarios, Impacts and Adaptation Measures – SIAM Project, Chapter 6: Coastal Zones, Editors Santos, F.D., Forbes, K. e Moita, D., Gradiva, Lisbon, 456 pág.

Barata, A. M. G. O., Teles, M. J. B. S., Vieira, J. A. R. (1996); Selecção de Ondas Representativas da Agitação Marítima para Efeito da Avaliação do Transporte Litoral na Costa de Aveiro, Recursos Hídricos – Associação Portuguesa de Recursos Hídricos, Vol. 17 n.º 1, pág. 43-74.

Barceló, J. (1971); Experimental Study of the Hydraulic Behavior of Inclined Groyne Systems, LNEC, Ministério das Obras Públicas, Lisboa.

Bodge, K. (2003); Coastal Engineering Manual, Part V, Sediment Management at Inlets, Chapter V-6, Engineer Manual 1110-2-1100, U.S Army Corps of Engineers, Washington, D.C., 209 pág.

Boswood, P., Murray, R. (2001); World-wide Sand Bypassing Systems: Data Report (Compiled 1997), Queensland Government – Environmental Protection Agency.

Brevard County (2009); Brevard County – Natural Resources Management Office, consultado em Maio de 2009.

http://www.brevardcounty.us/environmental_management/bbbb_nsrp_process.cfm

Carvalho, J., Barceló, J. (1966); Agitação Marítima na Costa Oeste de Portugal Metropolitano - Contribuição Para o Seu Estudo, Memória n.º 290, Ministério das Obras Públicas, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 34 pág.

CEM (2003); Coastal Engineering Manual, Engineer Manual 1110-2-1100, U.S Army Corps of Engineers, Washington, D.C. (6 volumes).

CHL (2008); Coastal & Hydraulics Laboratory, US Army Corps of Engineers, consultado em Outubro de 2008.

<http://chl.erdc.usace.army.mil/chl.aspx?p=s&a=ARTICLES;193&g=42>

Clausner, J. (1999); Sand Bypassing Cost and Performance Database, CETN-II-41, US Army Corps of Engineers.

Clímaco, M., Oliveira, F., Vicente, C. (2005); Manutenção e Melhoramento da Praia de Porto Santo, III Congresso Sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa, Maputo.

Coelho, C., Veloso-Gomes, F. (2003); Wave Climate and Longshore Sediment Transport in the Northwest Portuguese Coast, Proceedings of 3rd IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics RCEM 2003, Editors A. Sánchez-Arcilla and A. Bateman, Barcelona, Spain, pág.1037-1048.

Coelho, C. (2005); Riscos de Exposição de Frentes Urbanas para Diferentes Intervenções de Defesa Costeira, Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro, 395 pág.

CRL (1998); Carta de Risco do Litoral. Trecho 2: Foz do Douro – Nazaré, CEHIDRO - Centro de Estudos de Hidrossistemas, IST – Instituto Superior Técnico, INAG – Instituto da Água.

Diogo, M. (2004); Evolução da Linha de Costa da Praia da Vagueira, Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, 188 pág.

Ferreira, O. (1998); Morfodinâmica de Praias Expostas: Aplicação ao sector costeiro Aveiro - Cabo Mondego, Dissertação para obtenção de grau de Doutor de Ciências do Mar, Universidade de Faro, 337 pág.

Hales, L. (1995); Dredge plant equipment and systems processes, DRP95-10, Mississippi, 85 pág.

JAPA (1994); Hidroprojecto: Estudos especializados de modelação matemática para a Barra de Aveiro, 1º Relatório de progresso, Lisboa, 56 pág.

JAPA (1995); Hidroprojecto: Estudos especializados de modelação matemática para a Barra de Aveiro, 2º Relatório de progresso, Lisboa, 63 pág.

Loza (2008); Sand Bypassing Systems – Masters in Environmental Engineering, Tese de Mestrado, FEUP, 106 pág.

Marques, F. (1997); Sea Cliff Evolution: The Importance of Quantitative Studies for Hazard and Risk Assessment, and for Planning of Coastal Areas, Colectânea de Ideias Sobre a Zona Costeira de Portugal, Associação Eurocoast-Portugal, G. Soares de Carvalho, F. Veloso Gomes e F. Taveira Pinto, Porto, 67-86 pág. (in Portuguese).

Nóbrega, T. (2008); jornal diário Público, edição do dia 30 de Setembro, Lisboa.

Oliveira, I. (1997); Proteger ou Não Proteger ou Sobre a Viabilidade de Diferentes Opções Face à Erosão da Costa Oeste Portuguesa, Colectânea de Ideias Sobre a Zona Costeira de Portugal, Associação Eurocoast - Portugal, pág. 205-227.

Paixão, G. (2008); site consultado em Outubro de 2008.

<http://www.geocities.com/gpaixaopt/>

Pinheiro, J. (2006); Transposição Artificial de Sedimentos em Embocaduras, Tese de Mestrado, FEUP, 150 pág.

Richardson, T. (1990); Sand Bypassing, Handbook on Coastal and Ocean Engineering. J. B. Herbich, ed, Gulf Publishing Company, Houston, Tx.

Richardson, T. e McNair, E. (1981); A Guide to the Planning and Hydraulic Design of Jet Pump Remedial Sand Bypassing Systems, Instruction Report HL-81-1, Hydraulics Laboratory, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.

Van Oord (2008); Dredging and Marine Contractors, site consultado em Outubro de 2008.

<http://www.vanoord.com/>

Veloso-Gomes, F. (1995a); Exutor Submarino de Matosinhos - Estudo do Clima Marítimo - Regime Médio em Condições de Verão, Memória - Resumo do Estudo Realizado, 67 pág.

Veloso-Gomes, F. (2001); Situação da Costa Nova/Vagueira, Alimentação Artificial e Duna Artificial, FEUP, Instituto da Água.

Veloso-Gomes, F., Taveira-Pinto, F., Pais-Barbosa, J., Costa, J. e Rodrigues, A. (2006a); Estudo das intervenções na Costa da Caparica, 1.^a Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, FEUP.

Veloso-Gomes, F., Taveira-Pinto, F., Pais-Barbosa, J., Costa, J. e Rodrigues, A. (2006b); Monitoring of the coastal defence Works of Costa da Caparica, Portugal, Proceedings of 30th International Conference of Coastal Engineering, ASCE.

Veloso-Gomes, F., Taveira-Pinto, F., Neves, L. e Pais-Barbosa, J. (2006c); Pilot site of River Douro – Cape Mondego and case studies of Estela, Aveiro, Caparica, Vale do Lobo and Azores, EuroSION, FEUP.

Veloso-Gomes, F., Taveira-Pinto, F., Pais-Barbosa, J., Costa, J. e Rodrigues, A. (2007); As Obras de defesa costeira na Costa da Caparica, 2ª Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, FEUP.